



Jarkko Reinola

## **Prosessiunien ilmavuotojen määrittäminen**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 06.08.2015

Valvoja: Professori Pekka Ahtila

Ohjaajat: DI Esa Tamminen

DI Simo Isosaari

---

**Tekijä** Jarkko Reinola

---

**Työn nimi** Prosessiuunien ilmapuotojen määritys

---

**Laitos** Energiatekniikan laitos

---

**Professuuri** Teollisuuden energiatekniikka

---

**Professuurikoodi** Ene-59

---

**Työn valvoja** Professori Pekka Ahtila

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Esa Tamminen, DI Simo Isosaari

---

**Päivämäärä** 06.08.2015

**Sivumäärä** 111 + 9

**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Prosessiuunit muodostavat merkittävän osan öljynjalostamon energiankulutuksesta. Tässä diplomityössä käsitellään prosessiuunien ilmapuotojen vaikutusta uunin toimintaan ja polttoainekustannuksiin sekä tutkitaan keinoja ilmapuotojen määrittämiseksi, tavoitteena prosessiuunien energiatehokkuuden parantaminen.

Kirjallisuusosassa esitellään ilmapuotojen lämpö- ja virtausteknisen laskennan perusteet osana uunin ilma- ja savukaasukiertoa. Lisäksi käsitellään ilmapuotojen vaikutuksia prosessiuunin toiminnalle sekä puotojen paikantamisen ja mittaamisen mahdollisuuksia.

Soveltavassa osassa tarkastellaan Nesteen Porvoon jalostamon kolmen prosessiuunin ilmapuotoja simulointimallien ja kentällä tehtyjen kokeellisten mittausten avulla. Simulointimallit pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle todellista prosessia käyttämällä simuloinnin lähtöarvoina prosessin mittaustietoja sekä prosessiaine- ja polttokaasuanalyseja. Simuloinnista saatua palamisilmapuotaa verrataan mitattuun ilmapuotaan, jolloin saadaan määritettyä kokonaispuotomäärä.

Kokeellisia mittauksia tehtiin tarkasteltavien prosessiuunien tarkastusluukuille käyttäen mittaussuppilaa ja siipipyöräanemometriä. Mittausten avulla saadaan selvitettyä mittaustarkastuskohteiden puodot sekä laskettua mitatulle puotoaukolle kertavastuskerroin kirjallisuusosassa käsitellyn teorian avulla. Kertavastuskertoimen avulla määritetään edelleen simuloinnista saadun puotomäärän avulla uunin kokonaispuotopinta-ala.

Lopuksi ilmapuotojen aiheuttamia kustannuksia arvioidaan simulointimallien avulla. Tarkastelluissa uuneissa on sekä puotamattomia että puotavia uuneja. Puotavat uunit tulisi pyrkiä korjaamaan, sillä puodot aiheuttavat merkittäviä lisäkustannuksia ja huonontavat uunien energiatehokkuutta. Tässä työssä esiteltyä uunimallinnusta ja puototarkastelua tulisi soveltaa säännöllisesti myös muihin prosessiuuneihin. Näin pystytään seuraamaan uunin toimintaa jatkuvasti ja parantamaan uunien energiatehokkuutta.

---

**Avainsanat** Prosessiuuni, ilmapuoto, öljynjalostus, simulointi, energiatehokkuus

---

---

**Author** Jarkko Reinola

---

**Title of thesis** Determination of air leakages into process heaters

---

**Department** Department of Energy Technology

---

**Professorship** Industrial Energy Engineering**Code of professorship** Ene-59

---

**Thesis supervisor** Professor Pekka Ahtila

---

**Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s)** M.Sc. (Tech.) Esa Tamminen

M.Sc. (Tech.) Simo Isosaari

---

**Date** 06.08.2015**Number of pages** 111 + 9**Language** Finnish

---

## Abstract

Process heaters represent a significant part of the energy consumption in oil refinery. This master's thesis deals with the air leakage effects on operation and fuel costs of the process heater, as well as methods to determine the air leakage with the aim of improving the energy efficiency of process heaters.

The literary section presents the fundamentals of the flow dynamics and thermodynamics of the air leakages as a part of process heater air and flue gas cycle. Furthermore, this section deals with the impacts of the air leakages and analyses leakage detection and measurement opportunities.

The experimental section consists of air leakage determination of three process heaters in Neste's Porvoo refinery by means of simulation models and field measurements. Simulation models were made to match with the real process as closely as possible. Simulation inputs consisted of process measurements, process fluid analyses and fuel gas analyses. The total amount of air leakage could be determined by comparing simulation models with process measurements.

Field measurements were performed for the sight doors of each of the three process heaters by using a measurement funnel and a vane anemometer. The measurements could be used for the air leakage determination of the opening, as well as the calculation of the flow resistance coefficient of the leaky opening by using theory presented in the literary section. Furthermore, the resistance coefficient could be used for calculating the leakage area of the total leakage determined by the simulation models.

Finally, the cost of air leakage is estimated using same simulation models. Both leaky and tight process heaters are found among the studied heaters. Leaky process heaters should be repaired because air leaks cause significant additional costs and decrease the energy efficiency of the heaters. The simulation modelling and leakage determination presented in this master's thesis should be also applied to other process heaters on a regular basis. Thus heater operations could be monitored constantly and the energy efficiency of the heaters could be improved.

---

**Keywords** Process heater, air leakage, oil refining, simulation, energy efficiency

---

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Neste Oyj:n Porvoon jalostamon osaamiskeskuksessa 12.1.2015–10.7.2015 välisenä aikana. Haluan kiittää Nestettä mahdollisuudesta mielenkiintoisen ja monipuolisen diplomityön tekemiseen. Yhtiön tarjoamat puitteet työn tekemiselle olivat kaikin puolin erinomaiset.

Haluan esittää kiitokseni ohjaajilleni Esa Tammiselle, Simo Isosaarelle sekä Mirko Hokalle, jotka tekivät tärkeää työtä tämän diplomityön parissa. Erityiset kiitokset haluan esittää Esalle parhaasta ohjauksesta, mitä diplomityöntekijä voi toivoa. Ohjaus oli selkeää ja säännöllistä. Ennen kaikkea pidän arvokkaana, että Esa haastoi jatkuvasti ajattelemaan ja samalla jakoi oppejaan. Nämä opit kantavat vielä pitkälle tulevaisuuteen.

Suuret kiitokset myös professori Pekka Ahtilalle diplomityön valvomisesta ja tarkastamisesta.

Olen kiitollinen myös Nesteen muulle henkilökunnalle, jotka tarjosivat hienon työilmapiirin ja paljon apua työn teossa. Kiitos myös opiskelukavereilleni vertaistuesta diplomityön tekemisen aikana. Lopuksi haluan esittää erityiskiitokseni vanhemmilleni sekä avovaimolleni, jotka ovat olleet tukenani koko opintojeni ajan.

Porvoo 10.7.2015

Jarkko Reinola

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo .....	v
Merkinnät .....	vii
Lyhenteet .....	viii
1 Johdanto .....	1
1.1 Tausta .....	1
1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoitteet .....	1
1.3 Työn rakenne ja rajaus .....	2
Kirjallisuusosa .....	3
2 Prosessiuunit öljynjalostamolla .....	3
2.1 Prosessiuunin toiminta ja rakenne .....	3
2.2 Prosessiuunin energiatase .....	7
3 Palamisilma prosessiuunissa .....	16
3.1 Ilman virtaus uunin läpi .....	16
3.1.1 Luonnonvetouunit .....	17
3.1.2 Pakkovetouunit .....	25
3.2 Palamisprosessin ilmantarve .....	27
3.3 Ylimääräinen ilma .....	28
4 Ilmavuodot .....	32
4.1 Vaikutus prosessiuunin toimintaan .....	32
4.2 Ilmavuotojen arviointi laskennallisesti .....	34
4.2.1 Ilmavuotojen virtausteknisen laskennan perusteet .....	34
4.2.2 Laskenta savukaasu- ja palamisilmamittausten perusteella .....	41
4.2.3 Ilmavuotojen arviointikäyrät .....	43
4.2.4 Kokemusperäinen ilmavuotojen arviointikaava .....	46
5 Ilmavuotojen määrittäminen käytännössä .....	49
5.1 Ilmavuotojen paikannus .....	49
5.2 Vuotokohdat ja syyt .....	50
5.3 Ilmavuotojen mittaus .....	52
5.3.1 Ilmavirran mittaaminen mittaussuppilolla .....	53
Soveltava osa .....	55
6 Ilmavuotojen määrittäminen simuloinnin avulla .....	55
6.1 Uunisimulointiohjelma FRNC-5PC .....	55
6.2 Simulointitilanne ja ilmavuotojen määrittäminen .....	55
6.3 Tarkasteltavat prosessiuunit ja simulointitulokset .....	57
6.3.1 Kaasuöljyn jakotislausyksikön prosessiuuni BA-501 .....	58
6.3.2 Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön 3 prosessiuuni BA-10401 .....	65
6.3.3 MHC-tislausosan prosessiuuni BA-75001 .....	70
7 Ilmavuotojen kokeellinen mittaaminen .....	77
7.1 Mittauslaitteisto ja mittaustekniikka .....	77
7.2 Tarkastusluukut ja poltinluukut, BA-501 .....	79
7.3 Tarkastusluukut, BA-10401 .....	82
7.3.1 Tarkastusluukun virtaussimulointi ja mittaustulosten korjaus .....	87
7.4 Tarkastusluukut, BA-75001 .....	89
7.5 Kertavastuskertoimen määrittäminen .....	90

8	Tarkasteltavien prosessiuunien vuotokohdat .....	92
8.1	Havaitut vuotokohdat .....	95
8.1.1	Vuotokohdat, BA-501 .....	96
8.1.2	Vuotokohdat, BA-10401 .....	97
9	Vuotoilma ja sen aiheuttamat kustannukset .....	99
9.1	Vuotoilman aiheuttamat kustannukset .....	101
9.1.1	Kustannukset, BA-501 .....	101
9.1.2	Kustannukset, BA-10401 .....	103
10	Johtopäätökset ja jatkokehitysehdotukset .....	105
	Lähdeluettelo .....	107
	Liiteluettelo .....	111
	Liitteet	

## Merkinnät

A	[m <sup>2</sup> ]	pinta-ala
C	-	virtauskerroin
C <sub>d</sub>	-	purkautumiskerroin
g	[m/s <sup>2</sup> ]	putoamiskiihtyvyys
H	[m]	korkeus
$\dot{H}$	[W]	entalpiavirta
h	[J/kg]	ominaisentalpia
M	[g/mol]	moolimassa
$\dot{m}$	[kg/s]	massavirta
n	[mol]	ainemäärä
p	[Pa]	paine
Q	[W]	lämpövirta
q	[J/kg]	polttoaineen lämpöarvo
T	[°C tai K]	lämpötila
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	tilavuusvirta
v	[m/s]	virtausnopeus
w	-	massaosuus
x	-	höyrystymisaste
$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	lämmönsiirtokerroin
$\beta$	-	halkaisijasuhde
$\varepsilon$	-	pinnan emissiviteetti
$\zeta$	-	kertavastuskerroin
$\eta$	[%]	hyötysuhde
$\lambda$	-	ilmakerroin
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	tiheys
$\sigma$	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]	Stefan-BolzmANNin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$\Phi$	[W]	lämpöteho

## Lyhenteet

API	American Petroleum Institute
BA	Prosessiuuni
CA	Savupiippu
DA	Tislauskolonni
DC	Reaktori
EA	Lämmönsiirrin
GB	Puhallin / kompressori
KARP3	Kaasuöljyn rikinpoistoyksikkö 3
KTY	Kaasuöljyn jakotislausyksikkö
MHC	Mieto vetykrakkaus
NEXBTL	Nesteen uusiutuva diesel
OiLi-järjestelmä	Nesteen laboratoriojärjestelmä, josta voidaan lukea prosessista otettujen näytteiden tuloksia
PA	Reduktio
PÖY	Pohjaöljy-yksikkö
RT3	Raakaöljyntislausyksikkö 3
TBP	Panostislausmenetelmä (ASTM D-2892), jolla määritetään hiilivetyseoksen tislauskäyrä.
TOP-järjestelmä	Prosessitietojärjestelmä, josta voidaan seurata reaaliaikaista tai vanhaa mittausdataa Nesteen öljynjalostamolta
Tuubi	Lämmönsiirtopinta-alana käytettävä putki, jonka sisällä virtaa lämmitettävä tai jäähdytettävä prosessiaine

## Neste Oyj:n höyrynpaineiden lyhenteet

HS	41 bar(a) korkeapainehöyry
ES	6 bar(a) matalapainehöyry
LS	3,5 bar(a) matalapainehöyry



# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Energian hinta on ollut jatkuvassa kasvutrendissä jo pitkään, mikä on saanut yritykset tavoittelemaan entistä enemmän energiasäästöjä. Polttoaineiden hintojen nousu vähentää tuotannon kannattavuutta sekä näkyy myös kuluttajahinnoissa. Energiatehokkuuden kehittäminen on noussut yhä tärkeämmäksi asiaksi suomalaisessa teollisuudessa. Energiatehokkaammilla tuotantolaitoksilla voidaan parantaa kilpailukykyä kilpailijoihin nähden. Jo pienikin parannus energiatehokkuudessa voi tuoda isoja polttoainesäästöjä tuotantovolyymien ollessa suuri.

Neste Oyj on suomalainen öljynjalostus- ja markkinointiyhtiö, jonka toiminta keskittyy erityisesti puhtaampiin liikennepolttoaineisiin. Öljytuotteiden lisäksi yhtiön liiketoiminta-alueita ovat uusiutuvat tuotteet ja öljyn vähittäismyynti. Neste on tällä hetkellä maailman johtava uusiutuvan dieselin (NEXBTL) toimittaja. Nesteellä on öljynjalostustoimintaa viidessä eri maassa, kuudella eri jalostamolla. Näistä suurin on Porvoon jalostamo, jonka raakaöljyn jalostuskapasiteetti on noin 200 000 barreliä päivässä ja tuotanto noin 12,5 miljoonaa tonnia vuodessa. Porvoon Jalostamo on yksi Euroopan kehittyneimmistä ja monipuolisimmista öljynjalostamoista. Neste kehittää kuitenkin prosessejaan yhä energiatehokkaammiksi, tavoitteena kustannustehokkaampi ja vähäpäästöisempi öljynjalostustoiminta. Yritys on sitoutunut Suomen energiavaltaisen teollisuuden energiatehokkuusohjelmaan vuodesta 2009 alkaen. Yksi monista viime vuosien energiatehokkuutta parantavista toimenpiteistä on ollut prosessiaineiden lämmittämiseen käytettävien prosessiuunien uudistaminen ja vanhojen uunien toiminnan optimointi. (Neste Oil 2015a)

## 1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoitteet

Nesteen Porvoon jalostamolla on havaittu prosessiuunien savukaasuissa liiallista ylimääräshapetta ( $O_2$ ). Ylimäärähappi voi olla peräisin joko ylimääräisestä palamisilmasta tai uunien ilmavuodoista. Palamisilmamäärää pystytään säätämään optimaalisten palamisolosuhteiden luomiseksi, mutta ilmavuotojen suuruutta ja vaikutuksia ei ole toistaiseksi pystytty arvioimaan.

Tämän diplomityön tavoitteena kehittää ilmavuotojen suuruuden arviointimenetelmä, jonka avulla pystytään optimoimaan prosessiuunien operointia ja parantamaan hyötysuhdetta. Osana arviointimenetelmän kehittämistä pyritään myös vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Miten ilmavuodot vaikuttavat uunin toimintaan?
- Voidaanko ilmavuodot arvioida laskennallisesti?
- Miten ilmavuodot mitataan?

### **1.3 Työn rakenne ja raja**

Tämä diplomityö on jaettu kirjallisuusosaan ja soveltavaan osaan. Kirjallisuusosassa keskitytään palamisilman tarpeeseen ja kulkuun prosessiuunissa, ilmavuotojen vaikutuksiin ja laskennalliseen arviointiin sekä ilmavuotojen mittaushähdollisuuksiin. Lisäksi käsitellään prosessiuunien yleiset toimintaperiaatteet ja rakenteet.

Soveltavassa osassa arvioidaan laskennallisesti kolmen prosessiuunin ilmavuotoja käyttäen apuna simulointiohjelmaa sekä mitataan kokeellisesti näiden uunien ilmavuotoja. Saatua laskentatuloksia ja kokeellisia tuloksia verrataan keskenään, jotta voidaan arvioida menetelmien luotettavuutta ja sovittaa käytetyt menetelmät yhtenäiseksi ilmavuotojen arviointikokonaisuudeksi. Lisäksi kartoitetaan uunikohtaisesti mahdollisia vuotokohtia ja arvioidaan ilmavuotojen aiheuttamia hähdökustannuksia. Työn teoreettisessa osassa prosessiuunien käsittely rajoittuu pääosin Nesteen Porvoon öljynjalostamon yleisimpiin uunityyppeihin. Kokeellisessa osassa käsitellään työn laajuuden puitteissa vain kolmea uunia.

## Kirjallisuusosa

## 2 Prosessiuunit öljynjalostamolla

### 2.1 Prosessiuunin toiminta ja rakenne

Öljynjalostus on hyvin energiasäästävien teollisuuden ala, jossa modernin jalostamon kustannuksista kaksi kolmasosaa tulee energiasta (Lieberman 2009). Prosessiaineita lämmitetään joko höyryllä tai suoralla lämmityksellä (Mullinger & Jenkins 2008). Korkeimpiin lämpötiloihin ja suurimpiin prosessiaineen massavirtoihin päästään kuitenkin erilaisissa prosessiuuneissa suoran lämmityksen avulla. Uunin sisällä tuubeissa kulkeva prosessiaine lämmitetään haluttuun lämpötilaan polttoaineen palamisesta saatavan lämmön avulla. Prosessiaineet ja operointilämpötilat vaihtelevat paljon uunin käyttötarkoituksen ja prosessin vaiheen mukaan. Sinnott & Towler jakavat kemian teollisuuden uunit kuuteen eri kategoriaan käyttötarkoituksensa mukaan:

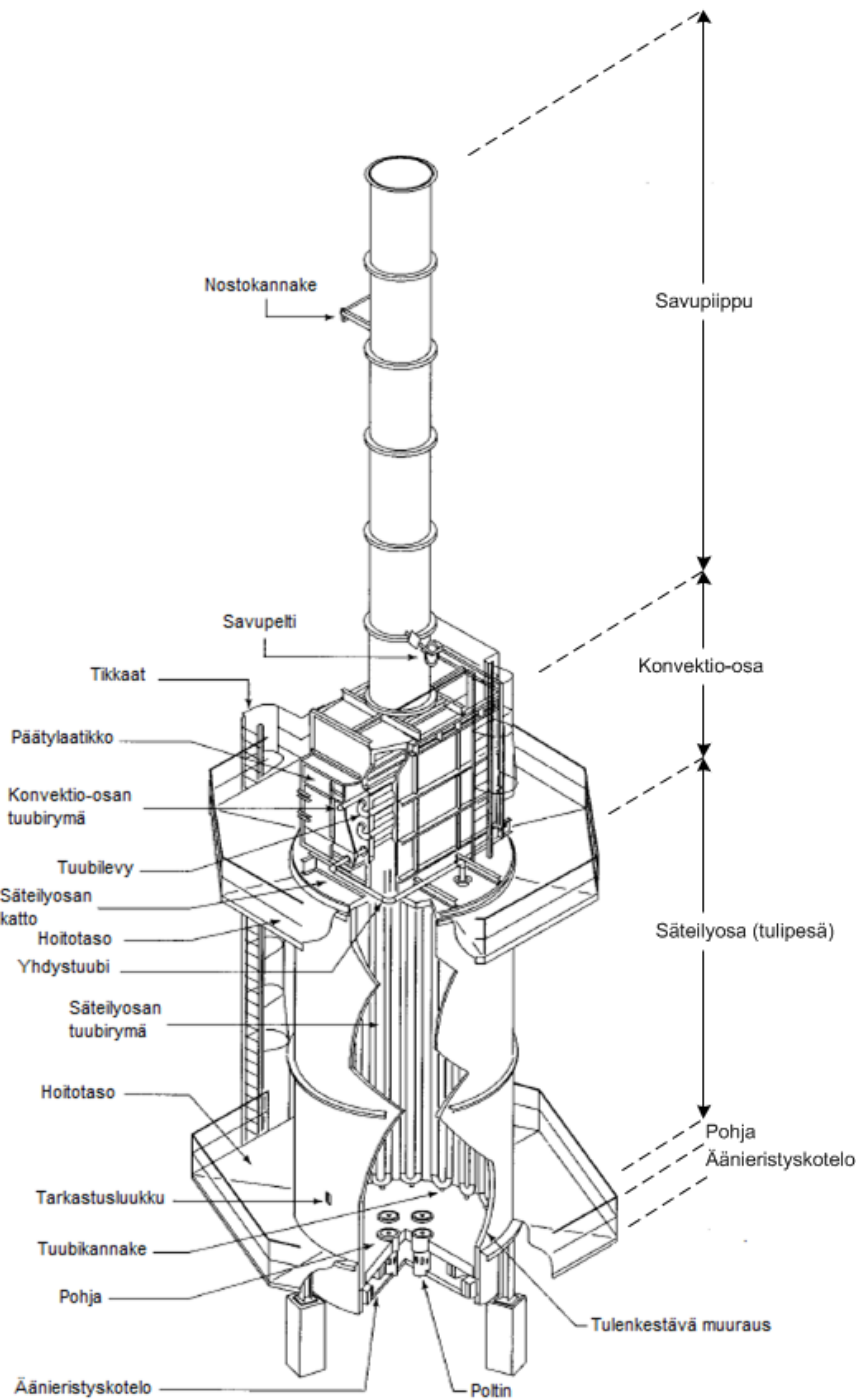
1. Prosessiuunit, joita käytetään jalostamon kolonnien ja reaktoreiden syötön kuumentamiseen ja höyryttämiseen.
2. Palamisprosessilla lämmitettävät kolonnien kiehuttimet
3. Palamisprosessilla lämmitettävät reaktorit
4. Vedyn tuotantoon käytettävät reformerit
5. Höyrykattilat
6. Kuumaöljyunit

(Sinnott & Towler 2009)

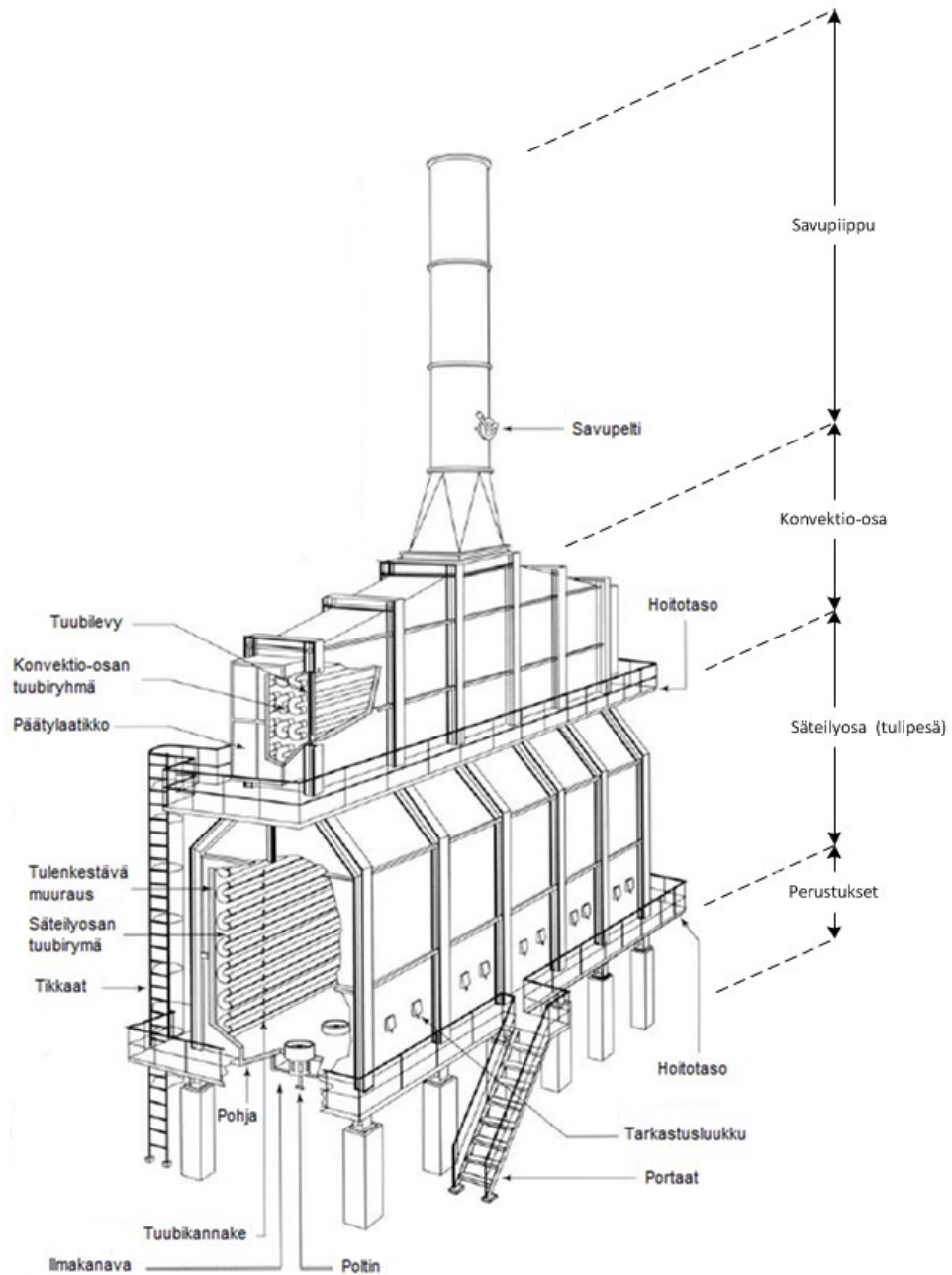
Yllä esitetyn luokittelun lisäksi prosessiteollisuudessa käytetään eteenin krakkaukseen (engl. ethylene cracking) suunniteltuja erikoisuuneja. Tässä työssä prosessiuunien toiminnan käsittely ja arvioiminen rajoittuu kategorioihin 1, 2 ja 6. Nesteen Porvoon jalostamolla tämän tyyppien uuneissa prosessiaine kiertää kokonaan nesteinä, kokonaan kaasuna tai neste- ja kaasufaasin seoksena riippuen uunin sijainnista prosessissa.

Prosessiuunien rakenne sekä tuubikokoonpano voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Tyyppisimmät prosessiuunien rakenteet on esitetty kuvissa 1 ja 2. Perustyyppit ovat ja sylinterin muotoinen uuni (kuva 1) ja suorakaiteen muotoinen laatikkouuni (kuva 2). Lisäksi

on olemassa monenlaisia variaatioita perustyyppien rakenteista. Näistä esimerkkinä erilaiset yhdistelmäuunit, joissa uunin tulipesä voi olla jaettu useampiin osiin, mutta savukaasut virtaavat yhdistettyyn konvektio-osaan sekä uunit joissa säteily- ja konvektio-osa on sijoitettu samaan tasoon, mutta osittain erotettu toisistaan seinämällä. (Trambouze 2000) Tässä työssä käsitellään kuitenkin vain perustyyppien rakenteen omaavia uuneja.



Kuva 1 Sylinterin muotoinen prosessiuuni pystysuorilla säteiliosan tuubeilla (Trambouze 2000).



**Kuva 2** Laatikkomallinen prosessiuuni vaakasuorilla säteilyosan tuubeilla (Trambouze 2000).

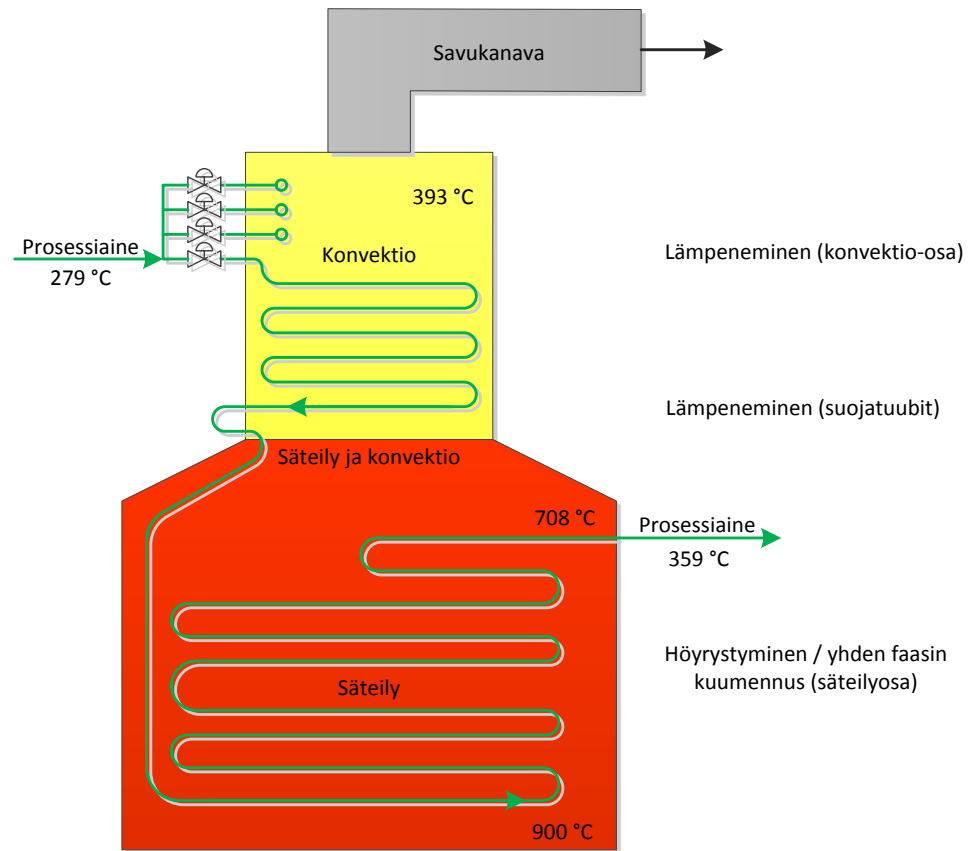
Prosessiuunin kuori on terästä, joka on sisäpuolelta pinnoitettu tulenkestävällä muurauksella, jonka tarkoitus on suojata teräsvaippaa liian korkeilta lämpötiloilta (Couper et al. 2012). Palamisprosessi tapahtuu uunin alaosassa, tulipesässä, jonka pohjalle tai seiniin polttimet on sijoitettu (Sinnott & Towler 2009). Polttimien liekin teoreettinen maksimilämpötila hiilivetypolttoaineilla ja stoikiometrisellä ilmamäärällä on noin 1900 °C (Couper et al. 2012).

Lämmönsiirtomekanismin perusteella prosessiuuni voidaan jakaa säteilyosaan ja konvektio-osaan. Säteilyosa on prosessiaineeseen absorboituneen lämpötehon kannalta uunin tärkein osa, sillä 60 % polttoaineen palamisesta saatavasta lämmöstä saadaan otettua talteen tässä osassa. Säteilyosassa tärkein lämmönsiirtomekanismi prosessiaineeseen on lämpösäteily, mutta lämpöä siirtyy myös konvektiolla savukaasuista. Säteilyosalla tarkoitetaan uunin tulipesää tai polttokammiota, jossa tuubit ovat alttiina palotapahtumasta aiheutuvalle lämpösäteilylle. (Ibrahim & Al-Qassimi 2013) Säteilyosan tuubit voidaan sijoittaa joko pystysuoraan (kuva 1) tai vaakasuoraan (kuva 2) tulipesän seinämille. Joissakin rakenteissa säteilyosan tuubit on sijoitettu tulipesän keskelle, jos polttimet on sijoitettu pohjan sijasta seinämille (Trambouze 2000).

Savukaasujen virtaussuunnassa säteilyosaa seuraa konvektio-osa, joka savukaasun virtauspinta-alaltaan huomattavasti tulipesää pienempi. Lisäksi tuubiryhmät on sijoitettu koko osan alueelle, kohtisuorasti savukaasujen virtaukseen nähden, jolloin lämmönsiirtopinta-ala saadaan suureksi. Konvektio-osan ensimmäisiä tuubirivejä kutsutaan suoja-tuubeiksi (engl. shield tubes) tai shokkituubeiksi (engl. shock tubes). Suojatuubit sijaitsevat yleensä tulipesän yläosassa, jolloin niihin kohdistuu sekä palamisprosessin lämpösäteilyä että savukaasujen konvektiivista lämmönsiirtoa. Näiden lämmönsiirtomekanismien yhteenlaskettu lämpövuoto on likimäärin samaa luokkaa kuin tulipesässä sijaitsevien säteilyosan tuubien. Suuren lämpövuon vuoksi suojatuubit ovat rivattomia, muista konvektio-osan tuubeista poiketen. Suojatuubien tarkoituksena on suojata konvektio-osan rivoitettuja tuubeja liian suurelta lämpövuolta, joka voisi johtaa ripojen vaurioitumiseen. Savukaasujen lämpötila suojatuubien kohdalla on yleensä noin 700–900 °C. (Couper et al. 2012) Varsinaiset konvektiotuubit ovat suojassa tulipesän lämpösäteilyltä, ja lämmönsiirto tapahtuu pääosin konvektion avulla. Tuubien ripojen avulla saadaan kasvatettua lämmönsiirtopinta-alaa ja siten parannettua lämmönsiirtoa savukaasuista. (Ibrahim & Al-Qassimi 2010)

Prosessiaineen virtausjärjestys uunin läpi on esitetty kuvassa 3. Prosessiaine virtaa yleensä savukaasuihin nähden vastavirtaan. Syöttö tuodaan ensimmäiseksi konvektio-osaan, jossa sitä lämmitetään. Tämän jälkeen prosessiaine virtaa konvektio-osan suoja-tuubeihin ja lopulta säteilyosan tuubeihin. Säteilyosan tuubeissa aine saavuttaa halutun lämpötilan ja höyrystymisasteen. Aineen ulostulo on yleensä säteilytuubiryhmän yläosassa. (Couper et al. 2012) Kuvan 3 esimerkkiauunissa syöttö jaetaan jakotukissa nel-

jään läpikulkuun ennen konvektio-osaa. Esimerkkiuunille on esitetty myös prosessivirran ja uunin lämpötilat eri kohdissa.

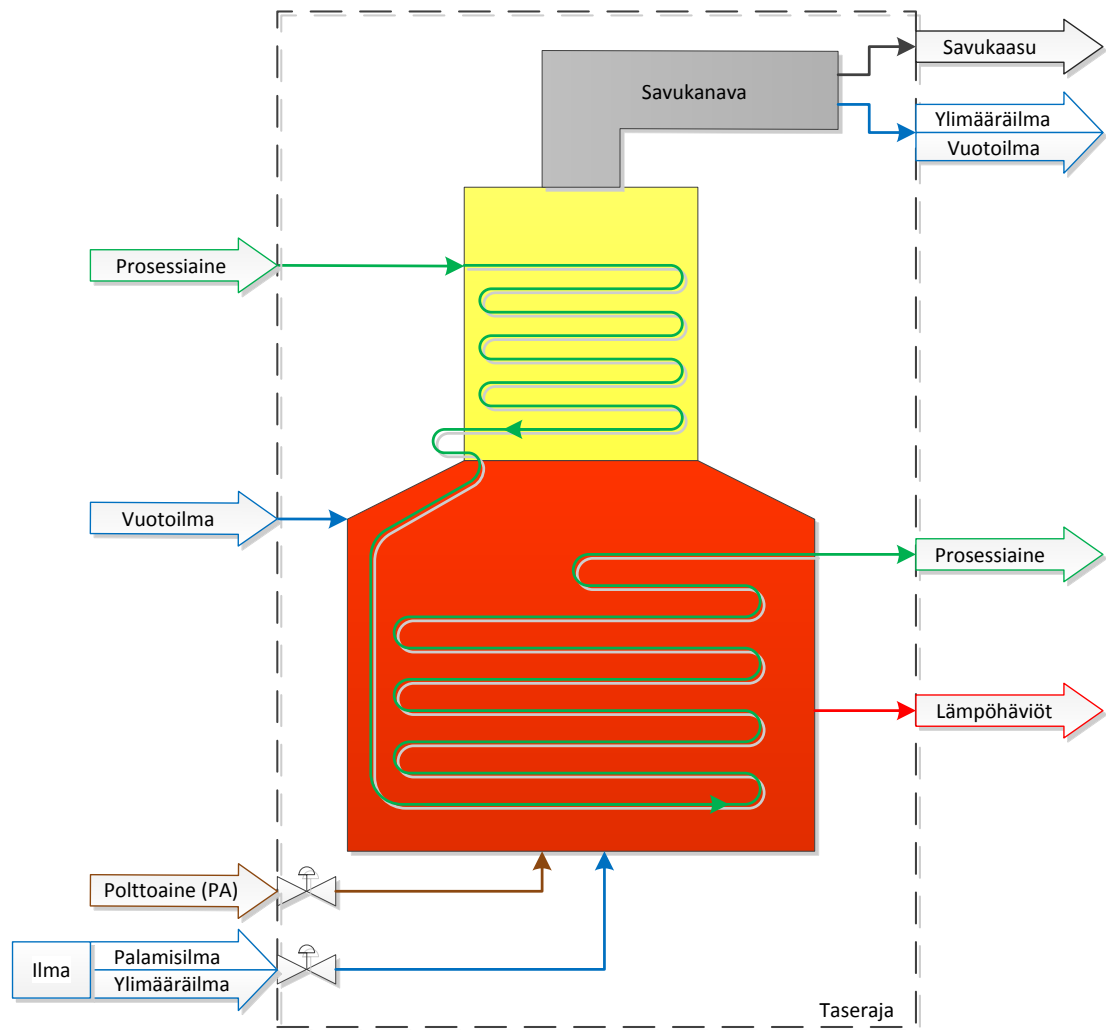


Kuva 3 Prosessiaineen virtaus uunin läpi ja pääasialliset lämmönsiirtomekanismit.

## 2.2 Prosessiuunin energiatase

Energiataseella voidaan analysoida prosessiuunin toimintaa sekä selvittää mistä prosessin lämpö saadaan ja mihin sitä käytetään. Usein energia tuodaan prosessiin fossiilisen polttoaineen kemiallisena energiana, virtaavien aineiden tuntuvana entalpiana, höyryyn sitoutuneena energiana tai sähköenergiana. Tuotu lämpöenergia puolestaan kuluu prosessista ulostulevien ainevirtojen lämmitykseen ja lämpöhäviöihin. (Thumann & Mehta 2013)

Kuvassa 4 on esitetty tyypillisen alipaineisen prosessiuunin energiatase. Taseraja on asetettu pelkästään uunin ympärille, ilman oheislaitteita. Taserajojen sisään tulevia virtoja ovat: prosessiaine, polttoaine, palamisilma, ylimääräilma ja vuotoilma. Rajojen sisäpuolelta poistuvia virtoja ovat: savukaasu, ylimääräilma, vuotoilma, prosessiaine ja lämpöhäviöt.



**Kuva 4** Alipaineisen prosessiuunin energia- ja massatase, jossa virrat tulevat taserajan sisään vasemmalta ja poistuvat oikealta.

Prosessiuunille tehdyn taserajauksen perusteella voidaan nyt kirjoittaa termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön perusteella energiatase, jossa tulevien entalpiavirtojen ja lähtevien entalpiavirtojen sekä lämpöhäviöiden summa on yhtä suuri:

$$\sum_{\text{Sisään}} \dot{H}_i = \sum_{\text{Ulos}} \dot{H}_i + \phi_{\text{Häviöt}} \quad (1)$$

Missä:

$\dot{H}_i$  aineen i entalpiavirta (W)  
 $\phi_{\text{Häviöt}}$  lämpöhäviöt (W)

(Thumann & Mehta 2013)



Kirjoitetaan entalpiavirrat massavirran ja entalpian avulla sekä merkitään polttoainevirtaa lämpövirtana. Kuvan 4 prosessiuunille voidaan energiatase kirjoittaa muotoon:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{PA} + \dot{m}_{Prosessiaine, sis.} h_{Prosessiaine, sis.} + \dot{m}_{Palamisilma} h_{Palamisilma} + \\ \dot{m}_{Ylimääräilma, sis.} h_{Ylimääräilma, sis.} + \dot{m}_{Vuotoilma, sis.} h_{Vuotoilma, sis.} = \dot{m}_{Savuk.} h_{Savuk.} + \\ \dot{m}_{Ylimääräilma, ulos} h_{Ylimääräilma, ulos} + \dot{m}_{Vuotoilma, ulos} h_{Vuotoilma, ulos} + \\ \dot{m}_{Prosessiaine, ulos} h_{Prosessiaine, ulos} + \dot{\Phi}_{Lämpöhäviöt} \end{aligned} \quad (2)$$

Missä:

$\dot{\Phi}_{PA}$	polttoaineesta saatava lämpöteho (kW)
$\dot{m}_i$	aineen i massavirta (kg/s)
$h_i$	aineen i entalpia (kJ/kg)
$\dot{\Phi}_{Lämpöhäviöt}$	prosessuunin lämpöhäviöt ulos (kW)

Öljynjalostuksen prosessiuuneissa käytetään polttoaineena tavallisesti maakaasua, polttoöljyä tai prosesseista saatavia polttokelpoisia poistokaasuja. Poistokaasuja käytettäessä sekoitetaan joukkoon usein maakaasua tasaamaan polttoaineen laatuvaihtelua ja helpottamaan käynnistystä. (Sinnott & Towler 2009) Polttoaineen koostumus vaikuttaa merkittävästi saatavaan lämpötehoon. Polttoaineesta saatava lämpöteho voidaan laskea kaavalla:

$$\dot{\Phi}_{PA} = \dot{m}_{PA} q_{PA} \quad (3)$$

Missä:

$\dot{m}_{PA}$	polttoaineen massavirta polttimelle (kg/s)
$q_i$	polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

Tehollisessa eli alemmassa lämpöarvossa palamisessa muodostunut vesi on savukaasuissa höyrynä. (Lampinen & Seppälä 2008) Nesteen jalostamon polttokaasun koostumus ja tehollinen lämpöarvo vaihtelee hyvin paljon uunien välillä.

Uunin tuleva prosessiaine tuo taserajojen sisäpuolelle lämpöenergiaa. Aine kuitenkin lämpenee ja voi myös höyrystyä uunissa, joten se sitoo energiaa polttoaineen palamisesta. Täten aineen mukana poistuu enemmän lämpöä kuin tulee ja nettolämpövirta on uu-

nista ulospäin. Prosessiaineen sitoma lämpöteho voidaan laskea energiataseessa esitettyjen entalpiavirtojen erotuksena:

$$Q_{\text{Prosessiaine}} = \dot{m}_{\text{Prosessiaine,ulos}} h_{\text{Prosessiaine,ulos}} - \dot{m}_{\text{Prosessiaine,sis.}} h_{\text{Prosessiaine,sis.}} \quad (4)$$

Prosessiaineen massavirta säilyy stationäärisessä tilanteessa samana, jolloin lämpötehoksi saadaan:

$$Q_{\text{Prosessiaine}} = \dot{m}_{\text{Prosessiaine}} (h_{\text{Prosessiaine,ulos}} - h_{\text{Prosessiaine,sis.}}) \quad (5)$$

Missä:

$\dot{m}_{\text{Prosessiaine}}$	prosessiaineen massavirta (kg/s)
$h_{\text{Prosessiaine,ulos}}$	ulos tulevan prosessiaineen entalpia (J/kg)
$h_{\text{Prosessiaine,sis.}}$	sisään menevän prosessiaineen entalpia (J/kg)

Palamisilman prosessille luovuttamaa tai sen sitomaa lämpötehoa ei voida laskea prosessiaineen tapaan sisään- ja ulostuloentalpioiden erotuksena, koska palamisilma reagoi polttoaineen kanssa muodostaen savukaasuja. Palamisilma voidaan jakaa komponentteihin ja laskea kunkin komponentin entalpian muutos verrattuna referenssilämpötilaan. Näin voidaan laskea energitaseessa ilman mukana sisään tuleva lämpöteho:

$$\dot{m}_{\text{Palamisilma}} h_{\text{Palamisilma}} = \sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{\text{sis.}}) - h_i(T_0)) \quad (6)$$

Missä:

$\dot{m}_i$	ilman komponentin i massavirta (kg/s)
$h_i(T_{\text{sis.}})$	komponentin i entalpia sisääntulolämpötilassa $T_{\text{sis.}}$ (kJ/mol)
$h_i(T_0)$	komponentin i entalpia referenssilämpötilassa $T_0 = 25 \text{ °C}$ (kJ/mol)

Erotusta komponentin lämpötilan ja referenssilämpötilan entalpian välillä ( $h_i - h_i(T_0)$ ) kutsutaan tuntuvaksi entalpiaksi. (Lampinen & Seppälä 2008)

Palamisilman mukana prosessiunin tulipesään virtaa ylimääräilmaa, joka ei kulu palamisessa. Ylimääräilma ei reagoi polttoaineen kanssa, vaan lämpenee tulipesässä ja poistuu samassa koostumuksessa savukaasujen mukana. Ylimääräilman sitoma lämpöteho voidaan laskea entalpiavirtojen erotuksena:

$$Q_{Ylimääräilma} = \dot{m}_{Ylimääräilma,ulos} h_{Ylimääräilma,ulos} - \dot{m}_{Ylimääräilma,sis.} h_{Ylimääräilma,sis.} \quad (7)$$

Ylimääräilma voidaan jakaa komponentteihin palamisilman tapaan, ja laskea jokaiselle komponentille entalpian muutos erikseen. Kaikkien komponenttien massavirta säilyy stationääritilanteessa vakiona. Merkitsemällä massavirrat yhtä suuriksi ja käyttämällä kaavaa (6) saadaan ilmavuodon sitoma lämpöteho laskettua kaavalla:

$$Q_{Ylimääräilma} = \sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{ulos}) - h_i(T_{sis.})) \quad (8)$$

Missä:

$\dot{m}_i$	ilman komponentin i massavirta (kg/s)
$h_i(T_{ulos})$	komponentin i entalpia ulostulolämpötilassa $T_{ulos}$ (kJ/mol)
$h_i(T_{sis.})$	komponentin i entalpia sisääntulolämpötilassa $T_{sis.}$ (kJ/mol)

Normaalitilanteessa voidaan olettaa, että palamisilmaa tulee polttimille riittävästi ja palaminen on täydellistä. Näin ollen uunin sisään pääsevä vuotoilma ei reagoi polttoaineen kanssa ja aiheuta jälkipolttoa. Vuotoilma käyttäytyy prosessiunissa ylimääräilman tapaan, ja vuotoilman sitoman lämpötehon laskemisessa voidaan soveltaa ylimääräilman laskennassa käytettyjä kaavoja (7) ja (8). Vuotoilmaan siirtyvää lämpötehoa määritettäessä on otettava huomioon lämpöhäviöiden vaikutus vuotoilman sisääntulolämpötilaan. Uunin pinnalta tapahtuvan konvektiivisen lämpöhäviön vuoksi lämpötehoa siirtyy uunia ympäröivään ulkoilmaan, jolloin ilman lämpötila nousee. Vuotoilman sisääntulolämpötila poikkeaa siis palamis- ja ylimääräilman sisääntulolämpötiloista. Vuotoilman sitomalle lämpöteholle saadaan muodostettua kaavat:

$$Q_{Vuotoilma} = \dot{m}_{Vuotoilma,ulos} h_{Vuotoilma,ulos} - \dot{m}_{Vuotoilma,sis.} h_{Vuotoilma,sis.} \quad (9)$$

$$Q_{Vuotoilma} = \sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{ulos}) - h_i(T_{Vuotoilma, sis.})) \quad (10)$$

Missä:

$\dot{m}_i$	ilman komponentin i massavirta (kg/s)
$h_i(T_{ulos})$	komponentin i entalpia ulostulolämpötilassa $T_{ulos}$ (kJ/mol)
$h_i(T_{Vuotoilma, sis.})$	komponentin i entalpia vuotoilman sisääntulo- lämpötilassa $T_{Vuotoilma, sis.}$ (kJ/mol)

Taserajojen ulkopuolelle virtaavien savukaasujen mukana siirtyvä lämpöteho saadaan ratkaistua palamisilman tapaan. Entalpioiden erotusta laskettaessa käytetään samaa referenssilämpötilaa kuin palamisilmalla. Savukaasujen mukana ulosvirtaava lämpöteho lasketaan kaavalla:

$$\dot{m}_{Savukaasu} h_{Savukaasu} = \sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{ulos}) - h_i(T_0)) \quad (11)$$

Missä:

$\dot{m}_i$	savukaasun komponentin i massavirta (kg/s)
$h_i(T_{ulos})$	komponentin i entalpia ulostulolämpötilassa $T_{ulos}$ (kJ/mol)
$h_i(T_0)$	komponentin i entalpia referenssilämpötilassa $T_0 = 25 \text{ °C}$ (kJ/mol)

Lämpöhäviöt uunin pinnalta ympäristöön tapahtuvat lämpösäteilynä ja vapaana konvektiona (Thumann & Mehta 2013). Lämpösäteilynä uunin ulkopinnalta poistuva lämpöteho saadaan kaavalla:

$$\Phi_{Säteily} = \varepsilon A_u \sigma (T_{uuni}^4 - T_{\infty, pinta}^4) \quad (12)$$

Missä:

$\varepsilon$	uunin ulkopinnan emissiviteetti (-)
$A_u$	uunin ulkokuoren pinta-ala (m <sup>2</sup> )
$\sigma$	Stefan-BolzmANNin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )
$T_{uuni}$	uunin ulkopinnan lämpötila (K)

$T_{\infty,pinta}$  ympäristön pintojen lämpötila (K)

Vapaan konvektion avulla tapahtuva lämpöhäviö prosessiuunin pinnalta lasketaan kaavalla:

$$\Phi_{Konvektio} = \alpha_u A_u (T_{uuni} - T_{\infty}) \quad (13)$$

Missä:

$\alpha_u$  lämmönsiirtokerroin uunin ulkopinnan ja ympäröivän ilman välillä (W/m<sup>2</sup>K)  
 $A_u$  uunin ulkokuoren pinta-ala (m<sup>2</sup>)  
 $T_{uuni}$  uunin ulkopinnan lämpötila (K)  
 $T_{\infty}$  ympäristön pintojen lämpötila (K)

Prosessiuunin ulkopinnalta tapahtuva kokonaislämpöhäviö on:

$$\Phi_{Lämpöhäviöt} = \Phi_{Säteily} + \Phi_{Konvektio} \quad (14)$$

$$\Phi_{Lämpöhäviöt} = \varepsilon A_u \sigma (T_{uuni}^4 - T_{\infty,pinta}^4) + \alpha_u A_u (T_{uuni} - T_{\infty}) \quad (15)$$

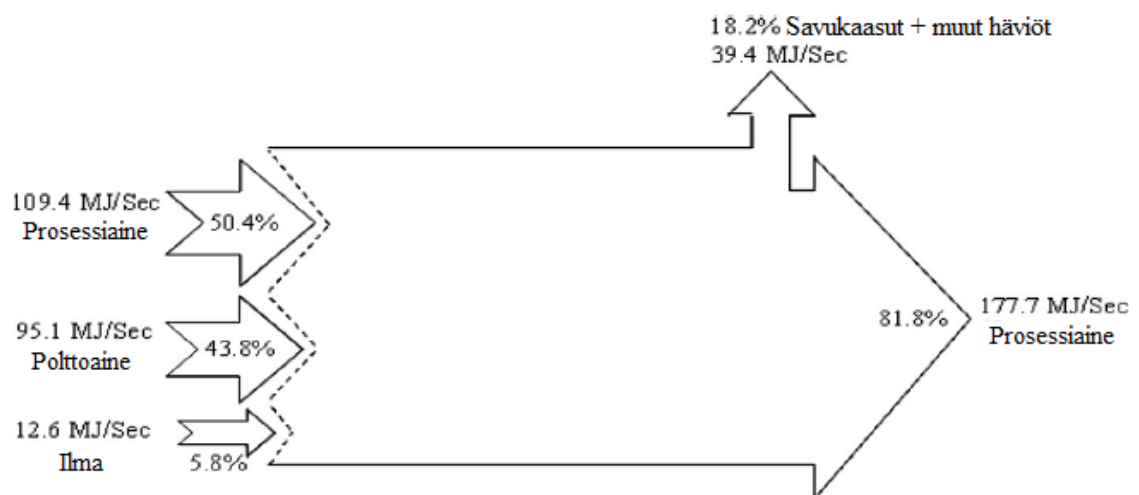
Kaavat (5)–(15) voidaan sijoittaa energiataseeseen (2), jolloin energiataseesta pystytään ratkaisemaan suureita, joita on hankala käytännössä mitata prosessiuuneista. Kun jokainen taserajojen läpi kulkeva virta on kirjoitettu auki, saadaan energiataseeksi:

$$\begin{aligned} & [\dot{m}_{PA} q_{PA}]_{Polttoaine} + [\sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{sis.}) - h_i(T_0))]_{Palamisima} \\ & = [\sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{ulos}) - h_i(T_0))]_{Savukaasu} \\ & + [\sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{ulos}) - h_i(T_{sis.}))]_{Ylimääräilma} \\ & + [\sum_i \dot{m}_i (h_i(T_{ulos}) - h_i(T_{Vuotoilma, sis.}))]_{Vuotoilma} \\ & + [\dot{m}_{Prosessiaine} (h_{Prosessiaine, ulos} - h_{Prosessiaine, sis.})]_{Prosessiaine} \\ & + [\varepsilon A_u \sigma (T_{uuni}^4 - T_{\infty,pinta}^4) + \alpha_u A_u (T_{uuni} - T_{\infty})]_{Lämpöhäviöt} \end{aligned} \quad (16)$$

Energiatohokkuuden kannalta yksi merkittävimmistä mittareista on systeemin hyötysuhde. Hyötysuhteella kuvataan prosessista saadun lämpötehon suhdetta prosessiin tuotuun lämpötehoon:

$$\eta = \frac{\text{Saatu lämpöteho}}{\text{Tuotu lämpöteho}} \quad (17)$$

Prosessiuunien lämpöteho tuodaan yleensä polttoaineen muodossa, mutta joissakin tapauksissa voidaan lämpötehoa tuoda myös ilman esilämmityksen avulla. Saadulla lämpötehoilla tarkoitetaan puolestaan prosessiaineeseen absorboitunutta, käyttökelpoista lämpötehoa. Muut energiataseen (16) ulostulopuolen termit ovat käytännössä häviöitä. (Mullinger & Jenkins 2008) Nykyaikaisten prosessiuunien hyötysuhteet ovat tyypillisesti 80–90 % riippuen polttoaineesta ja ilmamäärävaatimuksista (Sinnott & Towler 2009).



**Kuva 5** Prosessiuunin energiavirtojen sankey-diagrammi ilman savukaasujen jätelämmön talteenottoa (mukailtu Shekarchian et al. 2013).

Kuvassa 5 on esitetty sankey-diagrammin avulla tyypillinen energiatase prosessiuunille, jonka rakenne vastaa kuvassa 3 esitettyä uunityyppiä. Uunissa ei ole savukaasujen jätelämmön talteenottoa, vaan kaikki prosessiaineeseen absorboitumaton lämpöteho kuluu lämpöhäviöihin. Prosessiuuniin virtaavasta lämpöenergiasta 50,4 % tulee lämpimän prosessiaineen mukana, 43,8 % polttoaineen palamisesta ja 5,8 % palamisilman mukana. Prosessiaineen mukana poistuu 81,8 % lämpötehosta ja loput 18,2 % poistuu savukaasujen ja muiden häviöiden mukana. (Shekarchian et al. 2013) Tämän lämpötehoja-

kauman perusteella voidaan todeta prosessiaineen energiasisällöllä olevan suuri merkitys prosessiuunin energiataseeseen, jolloin muutokset prosessiaineen tilassa sisään- ja ulostulossa vaikuttavat merkittävästi polttoaineen kulutukseen.

Shekarchian et al. esittämässä esimerkkitapauksessa ei ole eritelty muiden lämpöhäviöiden vaikutusta energiataseeseen. Muiden lämpöhäviöiden voidaan kuitenkin olettaa olevan hyvin pieniä suhteessa savukaasuhäviöihin. Kuvassa esitetyn prosessiuunin energiataseen hyötysuhteena voidaan pitää 81,8 %, sillä tämä on se lämpöteho, joka sisään virtaavasta lämpötehosta saadaan hyötykäyttöön. Kuitenkin todellinen hyötysuhde tuodun polttoaineen ja ilman suhteen on pienempi. Prosessiaineen lämmittämiseen kuluu lämpöenergiaa 68,3 MJ/s, joka saadaan tuotettua polttoaineen ja ilman palamisreaktiossa. Polttoaineen ja ilman mukana tuodaan energiaa 107,7 MJ/s, ja todelliseksi hyötysuhteeksi saadaan kaavan (16) perusteella 63,4 %.

Shekarchian et al. mukaan prosessiuunin hyötysuhteeseen voidaan vaikuttaa lisäämällä savukaasujen jätelämmön talteenottoa prosessivirran lämmityksen jälkeen. Talteenotto voidaan toteuttaa esimerkiksi tulistamalla höyryä konvektio-osan loppupäässä tai lisäämällä palamisilman esilämmitin savukaasukanavaan. Höyryn tulistaminen prosessiuunin konvektio-osassa vähentää myös höyryntarvetta laitoksen höyrykattiloilta ja säästää polttoainekustannuksissa. (Shekarchian et al. 2013)

Suurimmalla osalla öljynjalostamoista prosessiuunit ovat suurin yksittäinen energiankuluttaja. Käytetyn polttoaineen määrä on niin suuri, että pienetkin parannukset hyötysuhteessa johtavat merkittäviin polttoainesäästöihin. Prosessiuunien hyötysuhteisiin voidaan pyrkiä vaikuttamaan monin eri tavoin, mutta ylimääräisen ilman on havaittu olevan yleisin todella huonoon hyötysuhteeseen johtanut tekijä. (Ahamad & Vallavanatt 2012)

### 3 Palamisilma prosessiuunissa

#### 3.1 Ilman virtaus uunin läpi

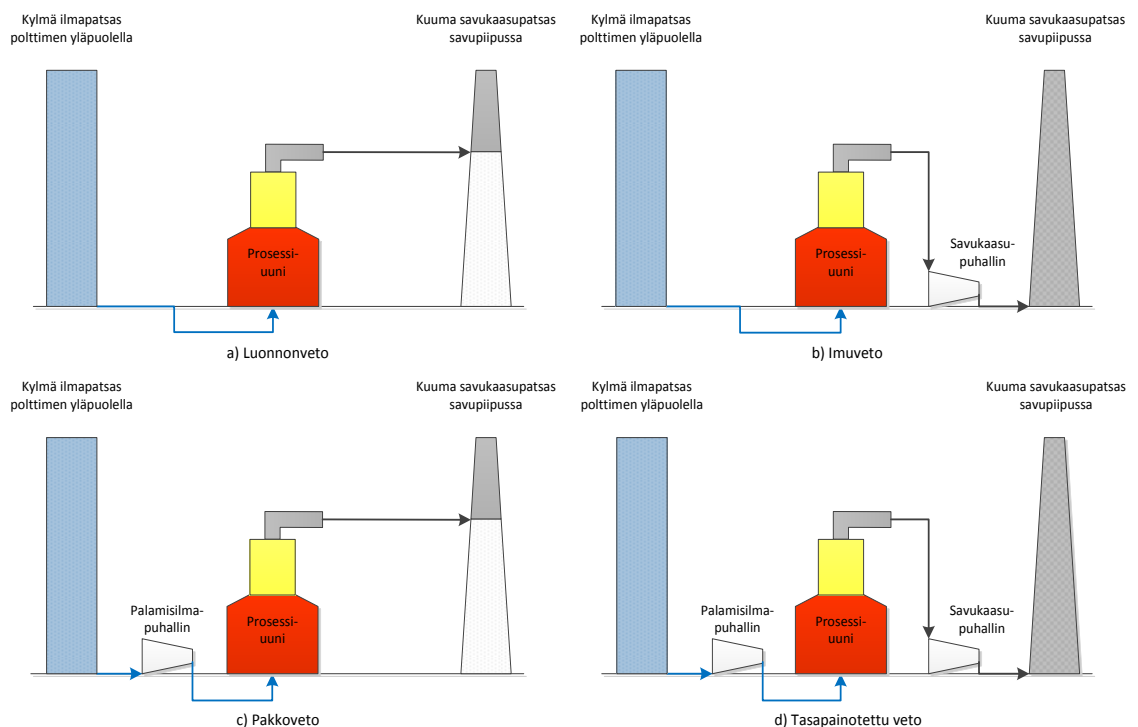
Palamisprosessissa polttoaine ja ilman happi reagoivat riittävän korkeassa lämpötilassa muodostaen lämpöä ja palamistuotteita. Polttoaineen ja ilman sekoittuminen ohjaa merkittävästi koko palamisprosessia. Palamisilman tuonnilla ja ilman virtauksella uunissa on siis suuri merkitys koko uunin suorituskykyyn. (Mullinger & Jenkins 2008)

Veto on prosessiuunin sisäpuolisen kaasukierron ja ulkoilman välinen paine-ero, joka mahdollistaa ilman tuonnin kosketuksiin polttoaineen kanssa, savukaasujen kierrättämisen uunin lämpöpinnoilla sekä savukaasujen poistamisen maan pinnan yläpuolella.

(Trambouze 2000) Prosessiuunin veto voidaan toteuttaa neljällä eri tekniikalla:

1. Luonnonveto (engl. natural draught)
2. Imuveto (engl. induced draught)
3. Pakkoveto (engl. forced draught)
4. Tasapainotettu veto (engl. balanced draught)

(Mullinger & Jenkins 2008)



**Kuva 6 Vedon luominen prosessiuunissa neljällä eri tekniikalla: a) luonnonveto, b) imuveto, c) pakkoveto ja d) tasapainotettu veto.**



Kuvassa 6 on esitetty eri tavat vedon luomiseksi prosessiuuniin. Luonnonvetouunissa ilma- ja savukaasuvirtaus tapahtuu luonnonkierron avulla ilman puhaltimia. Sen sijaan imu-, pakko- ja tasapainotetun vedon uuneissa virtauksen luomiseksi käytetään puhaltimia. Tässä työssä näistä uuneista käytetään yhteisnimitystä pakkovetouunit.

### 3.1.1 Luonnonvetouunit

Luonnonvetouunissa ilman virtaus prosessiuunin läpi perustuu viileän ulkoilman ja savupiipussa olevan kuumen savukaasun väliseen tiheyseroon (Lieberman 2009). Tiheyseron vuoksi uunin ja savupiipun sisäpuolella olevan savukaasupatsaan paino on pienempi kuin ulkopuolella olevan yhtä korkean ilmapatsaan paino. Tiheyseron vaikutuksesta uunista lähtevä kuuma savukaasu kohoaa ylöspäin piipussa aiheuttaen alipaineen prosessiuunin tulipesään ja ulkoilman sisäänvirtauksen uuniin (Mullinger & Jenkins 2008). Tätä uunin sisäpuolista alipainetta kutsutaan prosessiuunin vedoksi (Institution of Chemical Engineers 2012). Prosessiuuniin syntyvän vedon suuruuteen vaikuttavat erityisesti savukaasujen lämpötila ja savupiipun korkeus. (Lieberman 2009). Ulkoilmaa prosessiuunin sisään ajavan voiman suuruus luonnonvetouuneissa tyypillisesti 100–800 Pa (Mullinger & Jenkins 2008). Ajava voima voidaan laskea kaavalla:

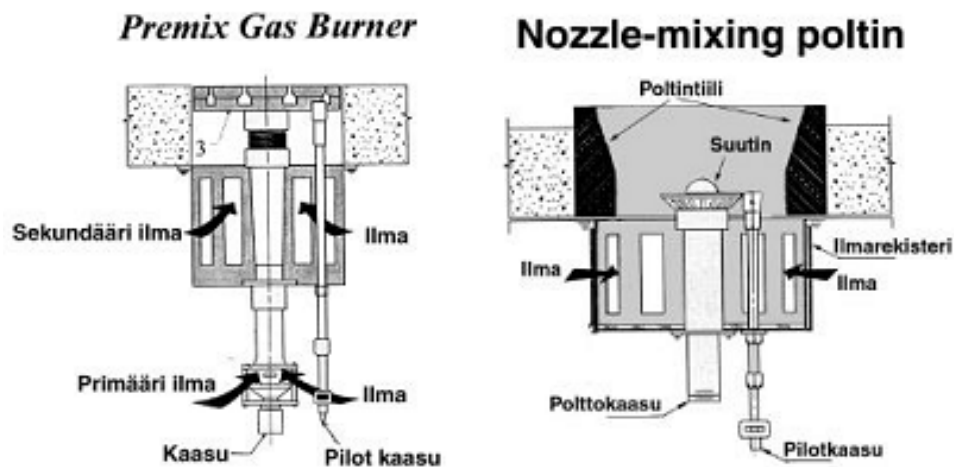
$$\Delta P = gH(\rho_{Savuk.} - \rho_{\infty}) \quad (18)$$

Missä:

$g$	putoamiskiihtyvyys ( $\text{m/s}^2$ )
$H$	savupiipun korkeus (m)
$\rho_{Savuk.}$	savukaasun tiheyden keskiarvo savupiipussa ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_{\infty}$	ulkoilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

Palamisilma voidaan tuoda uuniin kahdella eri tavoin riippuen poltintyyppistä. Kuvassa 7 on yleisimmät perinteiset kaasupoltintyytit prosessiuuneille. Kaasumaisilla polttoaineilla voidaan käyttää esisekoittavia polttimia (engl. premix gas burner), joissa ilma tuodaan yleensä kahdessa osassa. Primääri-ilma sekoitetaan polttoaineeseen ennen palamista, nopean polttoainevirran avulla venturiputkessa. (Lieberman 2009) Venturin suulla paineistettu polttokaasu luovuttaa osan liikemäärästään ilmalle. Tämän jälkeen aineet sekoittuvat ja niiden liike-energia muutetaan edelleen paineeksi venturin diffuusorissa (Trambouze 2000). Sekundääri-ilma tuodaan suoraan tulipesään säädettävän ilmarekis-

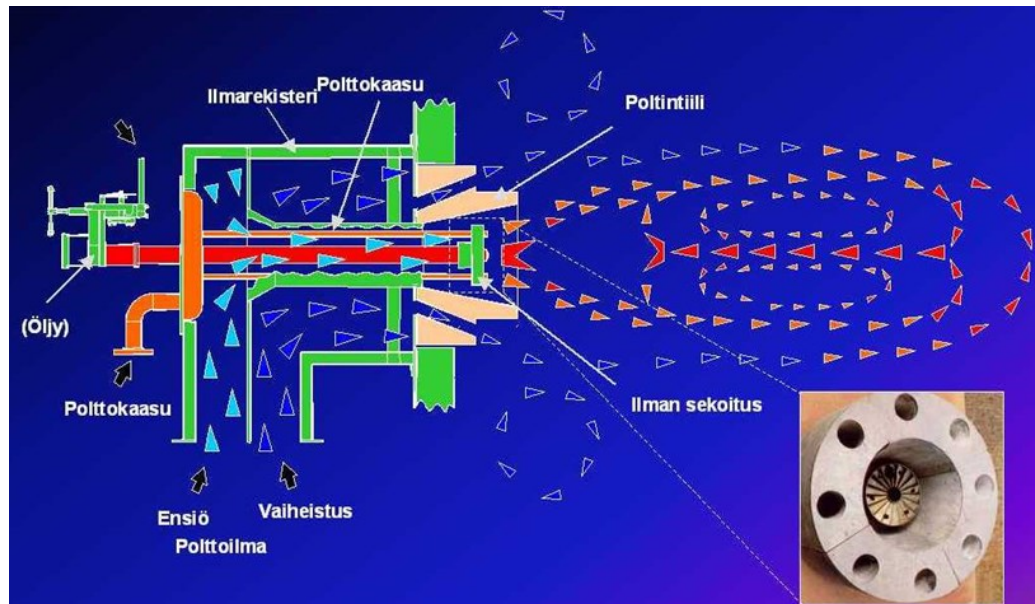
terin (engl. air register) kautta. Sekundääri-ilmalla varmistetaan, että palamiseen saadaan riittävästi ilmaa (Lieberman 2009). Esisekoittavien polttimien lisäksi palamisilma ja polttoaine voidaan tuoda uuniin täysin eri kanavaa pitkin. Tällöin käytetään diffuusiopoltinta (engl. turbulent jet diffusion burner, kuvassa 7 nozzle-mixing -poltin), jossa palamisilma sekoittuu polttoainesuihkuun vasta palokammiossa diffuusion ja polttoainevirtauksen turbulenssin vaikutuksesta. (Mullinger & Jenkins 2008) Luonnonveto-uuneissa polttimen aiheuttama painehäviö on yleensä 60–200 Pa ja maksimiteho noin 7 MW (Trambouze 2000).



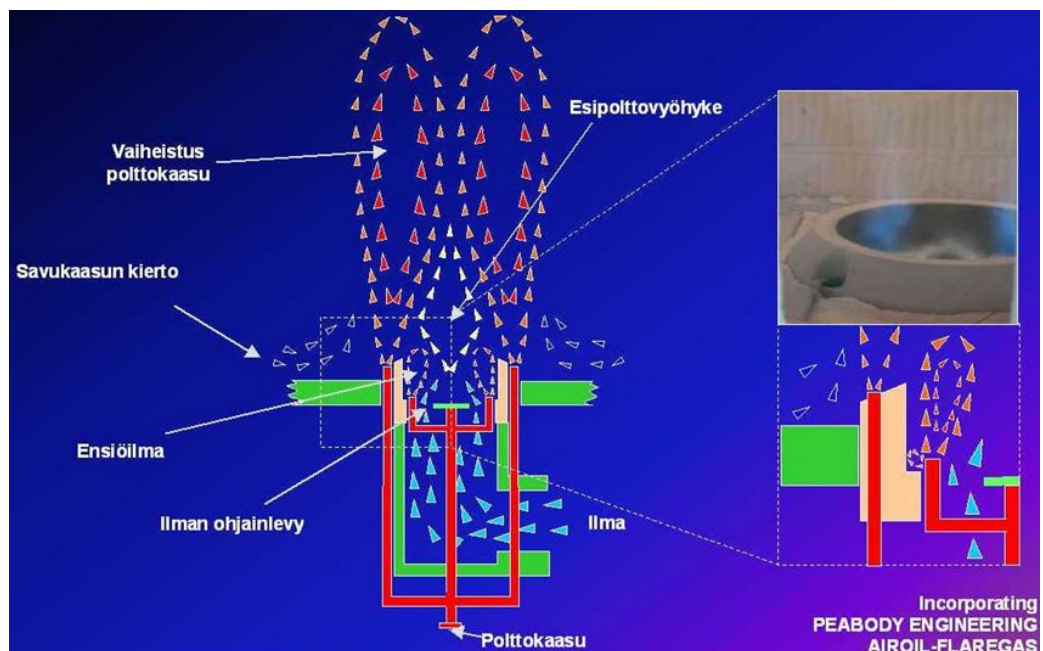
Kuva 7 Yleisimmät perinteiset poltintyypit prosessiuuneissa kaasumaisille polttoaineille (Neste Oil 1999).

Nykyisin on käytössä myös runsaasti erilaisia Low-NO<sub>x</sub> -polttimia, joissa palamisilman sekoittumista polttoaineen kanssa vaiheistetaan typen oksidien syntymisen vähentämiseksi. Vaiheistaminen voidaan tehdä joko vaiheistamalla palamisilman syöttöä tai vaiheistamalla polttokaasun syöttöä. Kuvassa 8 on esitetty tyypillinen nykyaikainen Low-NO<sub>x</sub> -poltin ja siinä tapahtuva palamisilman vaiheistus. Tässä polttimessa ilman ja polttoaineen sekoittuminen tapahtuu diffuusiopolttimen tapaan virtauksen turbulenssin ja diffuusion avulla vasta polttimen suuttimien ulkopuolella. Ensio- tai primääri-ilma tuodaan polttoaineen kanssa kosketuksiin välittömästi poltintiilen sisäpuolella. Varsinainen ilman vaiheistus tehdään kuitenkin sekundääri-ilmalla, joka tuodaan polttoaineen kanssa kosketuksiin poltintiilen ulkopuolella. Kuvassa 9 on esitetty Low-NO<sub>x</sub> -poltin polttokaasun vaiheistuksella. Myös tässä poltintyyppissä ilman ja polttoaineen sekoittuminen tapahtuu virtauksen turbulenssin ja diffuusion avulla suuttimien ulkopuolella. Palamisilman tuodaan polttimen sisäpuolelle yhdessä vaiheessa, ja vastaavasti polttokaasu

kahdessa vaiheessa. Osa polttokaasusta virtaa poltin tiilen sisäpuolella oleville primäärisuuttimille ja sekoittuu välittömästi polttimen keskustasta tulevan palamisilman kanssa.. Loput polttokaasusta tuodaan ilman kanssa kosketuksiin poltintiilen ulkopuolella olevien sekundäärisuuttimien kautta. Nesteen Porvoon jalostamon prosessiuneissa on käytössä sekä yllä esitettyjä perinteisiä kaasupolttimia että erilaisia Low-NO<sub>x</sub> -polttimia.



Kuva 8 Low-NO<sub>x</sub> -poltin ja ilman vaiheistus (Fortum 2003).



Kuva 9 Low-NO<sub>x</sub> -poltin ja polttokaasun vaiheistus (Fortum 2003).

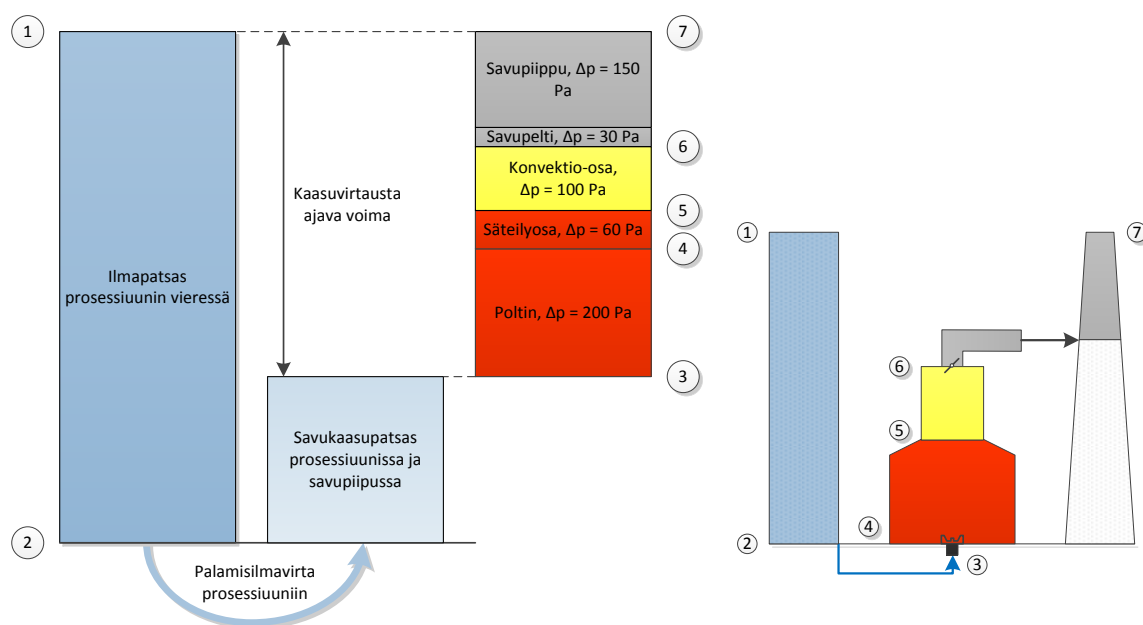
Polttimessa uuniin tuotu palamisilma muuttuu kemiallisten reaktioiden seurauksena savukaasuksi. Savukaasujen koostumus riippuu hyvin paljon polttoaineen koostumuksesta ja palamiseen käytettävästä ilmamäärästä. Ilman happi ( $O_2$ ) reagoi ideaalilanteessa pääosin vain polttoaineen sisältämän hiilen (C) ja vedyn (H) kanssa muodostaen hiilidioksidia ( $CO_2$ ) ja vettä ( $H_2O$ ). Myös polttoaineen sisältämät epäpuhtaudet, kuten rikki (S) muodostavat oksideita, jotka päätyvät savukaasuihin. (Mullinger & Jenkins 2008)

Polttoaineen sisältämien tärkeimpien komponenttien palamisreaktiot on esitetty luvussa 3.2. Palamisreaktio ei kuitenkaan koskaan ole täysin täydellinen, minkä vuoksi syntyy myös muita yhdisteitä, kuten hiilimonoksidia (CO) ja typen oksideita (NO ja  $NO_2$ ). Näiden yhdisteiden muodostumiseen vaikuttaa muun muassa palamislämpötila, tulipesän paine ja ilmamäärä. (Lampinen & Seppälä 2008) Epätäydellinen palaminen laskee uunin hyötysuhdetta, sillä reaktiossa vapautuu vähemmän lämpöä. Usein uuniin virtaa myös ylimääräistä ilmaa, joka ei kulu palamisreaktiossa vaan siirtyy savukaasujen mukana ulos uunista. (Mullinger & Jenkins 2008)

Savukaasujen virtaussuunta uunin tulipesässä voi vaihdella paljon. Pääasiallinen virtaussuunta on kuitenkin ylöspäin, johtuen uunin vedosta ja uunin alaosaan sijoitettujen polttimien tuottamasta kaasuvirrasta. (Baukal & Bussman 2011) Savukaasujen virratessa prosessiuunin säteilyosan läpi osa niiden emittoimasta lämpösäteilystä absorboituu säteilyosan tuubeihin ja edelleen prosessiaineeseen (Sinnott & Towler 2009). Säteilyosan tuubit ovat selvästi muuta tulipesää viileämpiä, mikä voi aiheuttaa savukaasujen jäähtymistä ja kääntää virtaussuunnan paikallisesti alaspäin (Baukal & Bussmann 2011). Säteilyosan jälkeen savukaasut virtaavat konvektio-osaan, jossa ne jäähtyvät edelleen luovuttamalla osan lämmöstään konvektio-osan tuubeihin ja edelleen prosessiaineeseen. Valtaosa savukaasuvirtauksen painehäviöstä prosessiuunin sisällä tapahtuu konvektio-osassa. Konvektio-osassa painehäviöitä aiheuttavat etenkin tuubirivit. Säteilyosan painehäviö on konvektio-osaan verrattuna pieni, jonka vuoksi se jätetään usein myös huomiotta. (Sinnott & Towler 2009) Baukal & Bussmanin mukaan tyypillisen prosessiuunin säteilyosan painehäviö on kuitenkin noin 60 Pa ja konvektio-osan painehäviö noin 100 Pa (Baukal & Bussman 2011).

Prosessiuunin lämmönsiirtopintojen jälkeen savukaasu johdetaan savukaasukanavaan ja savupiippuun. Savupiippu on muun uunin tapaan myös alipaineessa, ja savukaasuja ajava voima on ulkoilman ja savukaasun tiheyserosta johtuva veto. Piipussa savukaasun

lämpötila laskee lämpöhäviöiden seurauksena edelleen. Savukaasujen lämpötila ja uunin korko merenpinnasta vaikuttavat olennaisesti savupiipun korkeusvaatimuksiin. Riittävällä piipun korkeudella varmistetaan sopiva veto koko uunin matkalle. Luonnonvetouunin kaasuvirtausta ajavan voiman suuruus on suoraan verrannollinen savupiipun korkeuteen, kuten kaavasta (18) voidaan huomata. Savupiipun sisään- ja ulostulot, savupelti sekä virtauskitka aiheuttavat painehäviöitä savukaasuvirtaukselle. (Sinnott & Towler 2009) Baukal & Bussmanin mukaan tyypillisen savupiipun painehäviö on noin 150 Pa (Baukal & Bussman 2011).

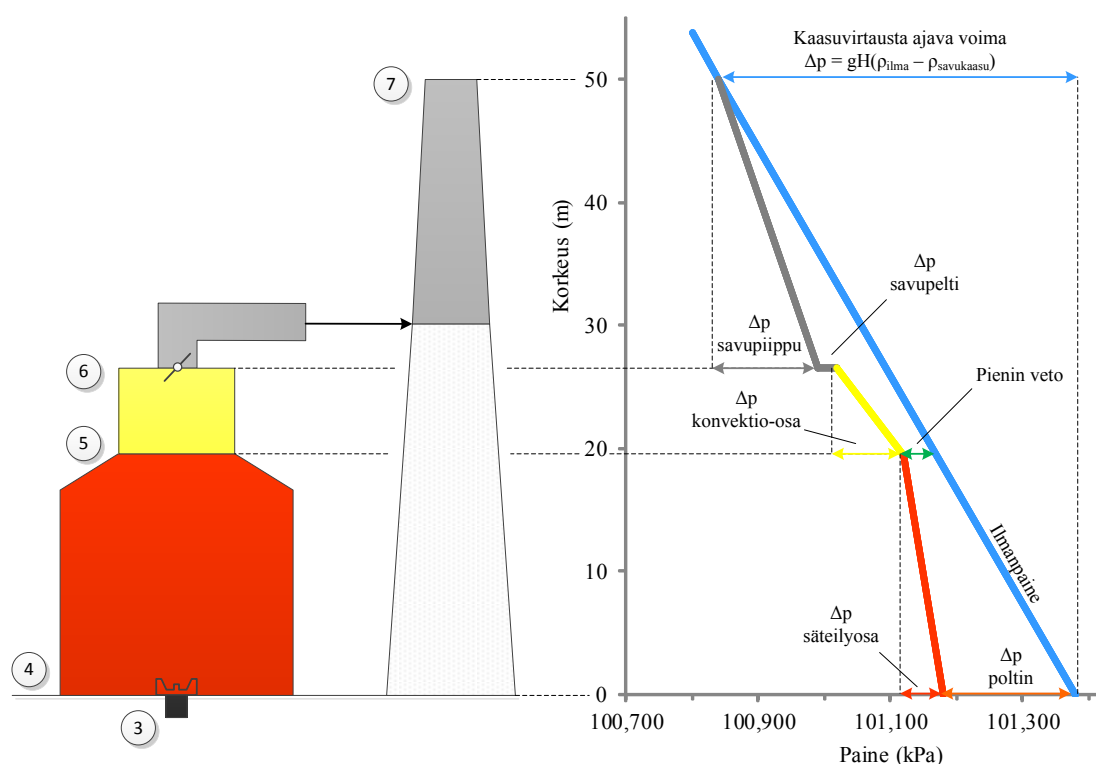


**Kuva 10 Luonnonvedon ajavan voiman kuluminen prosessiuunissa. Kuvan molemmissa osissa esitetty numerointi kuvaa ilma- ja savukaasukierron vaiheita uunin eri osissa.**

Prosessiuunin jokainen osa-alue aiheuttaa painehäviöitä ilma- ja savukaasuvirrassa. Kuvassa 10 on esitetty prosessiuunin kaasuvirtausta ajavan voiman kulumisen uunin eri osissa. Uunin vieressä voidaan kuvitella olevan ilmapatsas, jonka korkeus on sama kuin prosessiuunin ja savupiipun yhteenlaskettu korkeus. Ilmapatsaan omasta painosta aiheutuu hydrostaattinen paine, joka on suurempi kuin uunin ja piipun sisällä olevan savukaasupatsaan hydrostaattinen paine. Tämä paine-ero (kaava (18)) aiheuttaa ajavan voiman, jonka seurauksena ulkoilma virtaa uunin polttimille. Uunin sisällä polttimilta tuleva savukaasu virtaa uunin osien läpi, jotka aiheuttavat painehäviöitä, ja siten kuluttavat virtausta ajavaa paine-eroa. Lopulta virtaus saavuttaa savupiipun ulostulon, ja kaikki

ajava voima on kulunut virtauksen painehäviöihin. Savukaasun paine on ulostulon jälkeen yhtä suuri kuin ympäröimä ulkoilman paine.

Uunin vedon suuruus kullakin korkotasolla saadaan kaasuvirtausta ajavan voiman ja uunissa tapahtuvien kitka- ja nopeushäviöiden erotuksesta. Vedon tulisi olla koko kaasuvirtauksen matkalla riittävä alipaineen säilyttämiseksi. Jos veto ei ole riittävä koko uunin matkalla, paine nousee yli ilmanpaineen, mikä aiheuttaa savukaasujen vuotoja ulos uunin tulipesästä. (Ahamad & Vallavanatt 2012) Kuumat savukaasut voivat vaurioittaa teräsrakenteita, muurauksia sekä muita tukirakenteita, ja siten lyhentää prosessi-uunin elinikää. Savukaasuvuodot heikentävät myös konvektio-osalta absorboituvan lämmön määrää, mikä näkyy suoraan prosessiaineen ominaisuuksissa. (Lieberman 2009)



**Kuva 11 Luonnonvetouunin paineprofiili. Numeroidut pisteet vastaavat kuvan 10 numerointia. (mukailtu: Baukal & Bussman 2011)**

Kuvassa 11 on esitetty tyypillisen luonnonvetouunin vetoprofiili. Koron nollassoksi on valittu poltintaso ja piipun ulostulo on 50 metrissä nollassoon nähden. Ilmanpaine muuttuu lineaarisesti nollasson 101,380 kPa:sta piipun ulostulotason 100,840 kPa:iin. Sen sijaan uunin ilma- ja savukaasukierron paine ei muutu lineaarisesti. Ilma tulee pol-

tintasolle ulkoilman paineessa. Polttintasolla polttimista aiheutuu 200 Pa:n painehäviö ilman korkeuden muutosta. Polttintasolla ilma muuttuu kuumaksi savukaasuksi ja sen tiheys laskee, mikä aiheuttaa paine-eron vedon ulkoilman ja tulipesän välille. Tämän jälkeen savukaasu virtaa ylöspäin säteily- ja konvektio-osien läpi, joissa kummassakin osassa painehäviön oletetaan olevan lineaarinen. Konvektio-osan jälkeen savukaasu törmää savupeltiin, jossa tapahtuu polttimien tapaan 30 Pa:n painehäviö ilman korkeuden muutosta. Savupellin jälkeen savukaasut poistuvat ilmaan savupiipun kautta, jonka painehäviön oletetaan olevan lineaarinen. Savupiipun ulostulossa savukaasujen paine vastaa ulkoista ilmanpainetta samalla korkeudella. Vedon suuruus kullakin korkotasolla on ilmanpainekäyrän ja savukaasun painekäyrän välinen erotus. Kuvasta 11 nähdään että prosessiuunin sisällä suurin veto on yleensä tulipesän alaosassa, polttimien lähellä ja konvektio-osan ulostulossa. Sen sijaan pienin veto on yleensä säteilyosan yläosassa, minkä vuoksi siellä on suurin riski ylipaineen saavuttamiseen ja savukaasujen ulosvirtaukseen huonovetoisella uunilla. Ahamad & Vallavanattin mukaan sopiva tavoitearvo uunin tulipesän yläosan vedolle on noin 25 Pa alipainetta. Suurempi veto uunissa saattaa aiheuttaa kylmän ulkoilman vuotamista prosessiuunin sisään. (Ahamad & Vallavanatt 2012)

Prosessiuunin veto vaihtelee jatkuvasti riippuen ulkoilman ominaisuuksista ja uunin operoinnista. Ulkoilman tiheys ja siten myös ilmapatsaan paino riippuvat lämpötilasta ja kosteudesta. (Trambouze 2000) Myös tuuli vaikuttaa vedon suuruuteen. Prosessiuunin tuulen puoleisille sivuille muodostuu patopaine, minkä vuoksi ilmanpaine on suurempi. Vastaavasti tuulelta suojassa olevalle sivulle muodostuu hieman normaalia ilmapainetta pienempi paine. Jos tulipesän paine pysyy vakiona, tuulen puoleiselle osalle prosessiuunia muodostuu suurempi veto kuin tuulelta suojassa olevalle osalle. Epätasaisesti jakautuneen vedon vuoksi myös polttimien toiminnassa on vaihtelua. Tuulen puolella olevat polttimet hyötyvät tuulen myötä kasvaneesta vedosta. (Institution of Chemical Engineers 2012)

Uunin operointi vaikuttaa savukaasujen lämpötilaan, joka edelleen vaikuttaa savukaasujen tiheyteen ja savukaasupatsaan painoon. Vetoon voidaan kuitenkin vaikuttaa myös suoralla savukaasuvirtauksen operoinnilla. Käytännössä uunia joudutaankin usein säätämään, jotta veto tulipesän yläosassa pystytään pitämään optimiarvossa. (Trambouze 2000) Vedon säätäminen tehdään sekä savukaasukanavassa olevalla säätöpellillä että sekundääri-ilmarekistereillä. Näiden yhteissäädöllä pyritään sopivan vedon lisäksi tuo-

maan oikea määrä palamisilmaa uuniin. Avaamalla savupeltiä ja sulkemalla sekundääri-ilmarekisterejä saadaan lisättyä vetoa, kun taas sulkemalla savupeltiä ja päästämällä enemmän ilmaa sekundääri-ilmarekistereistä saadaan vetoa pienennettyä. (Lieberman 2009) Trambouzen mukaan savupellin ja ilmarekistereiden säätö tulisi kuitenkin pitää toisistaan erillään. Veto tulisi säätää optimiarvoonsa pelkästään savupellin avulla ja vastaavasti sopiva palamisilmamäärä tulisi säätää ilmarekistereillä. (Trambouze 2000)

Prosessiuunin veto mitataan yleensä U-putkimittarilla, joka mittaa ulkoilman ja savukaasukierron välisen paine-eron millimetreinä vesipatsasta ( $\text{mm H}_2\text{O}$ ). (Trambouze 2000). Vetomittareissa paine-eroa verrataan vesipatsaan korkeuteen, koska monesti paine-ero on liian pieni mitattavaksi tavallisilla painemittareilla. (Institution of Chemical Engineers 2012) Nesteen Porvoon jalostamolla prosessiuunien veto ilmoitetaan kuitenkin prosessitietojärjestelmissä Pascaleina (Pa). Vetomittarit on kalibroitu näyttämään nollaa, kun paine uunin sisäpuolella on sama kuin ulkoilman paine. Mittarin osoittaman paineen ollessa positiivinen uunin sisäpuolinen paine on suurempi kuin ulkoilman paine ja paineen ollessa negatiivinen uunin sisäpuolinen paine on pienempi kuin ulkoilman paine. Prosessiuunin veto on siis sitä suurempi mitä negatiivisempi vetomittarin ilmoittava arvo on. (Institution of Chemical Engineers 2012)

Vetomittareiden lisäksi palamistapahtumalle riittämätön veto voidaan havaita savukaasuista happipitoisuuden ( $\text{O}_2$ ) laskuna lähes nollaan ja hiilimonoksidipitoisuuden ( $\text{CO}$ ) kasvuna. Pitoisuuksien muutos johtuu epätäydellisestä palamisesta, joka on seurausta riittämättömästä ilmamäärästä tulipesässä. Liebermanin mukaan riittämättömään vetoon on kolme yleistä syytä: likaantunut konvektio-osa, ulkoilman vuodot uuniin ja suljettu savupelti. Konvektio-osan rivoitetut tuubit voivat likaantua savukaasujen sisältämistä palamistuotteista, etenkin polttoöljyä käytettäessä. Palamistuotteet kertyvät tuubien ympärille muodostaen riittävän virtausvastuksen savukaasulle. Tällöin konvektio-osan painehäviö kasvaa ja veto tulipesässä vähenee. Ulkoilman vuotaminen uuniin puolestaan jäähdyttää savukaasuja sekä lisää savukaasun painehäviötä kasvattamalla sen tilavuusvirtaa. Savupellillä säädetään usein vetoa pienemmäksi, kun uunia operoidaan vajaateholla. Vajaateholla ajon jälkeen savupelti voi olla juuttunut tai unohtunut avata, jolloin polttotehon lisääntyessä veto vähenee huomattavasti. (Lieberman 2009)



Luonnonvetouunin yksi merkittävimmistä hyödyistä on puhaltimien puuttuminen. Puhaltimien käyttö lisää uunin sähkönkulutusta ja mahdollisten toimivuusongelmien riskiä. Luonnonvetouunin hyötysuhdetta rajoittaa kuitenkin savukaasulta vaadittava riittävän korkea lämpötila. Riittävän vedon luomiseksi savukaasut on päästettävä savupiippuun korkeammassa lämpötilassa kuin pakkovetouuneissa. Tämän takia ei voida käyttää hyötysuhdetta parantavia ilman esilämmittimiä, jotka ottavat lämpönsä savukaasuista konvektio-osan loppupäässä. Ongelma tulee erityisesti esille lämpimissä ilmastoissa, joissa ulkoilman lämpötila on luonnostaan suurempi ja tiheys pienempi. (Mullinger & Jenkins 2008) Lisäksi liian alhainen savukaasujen poistumislämpötila uunista voi johtaa lämpötilan laskuun kastepisteen alapuolella savupiipussa. Kastepisteen saavutettuaan rikin oksidit alkavat lauhtua aiheuttaen korroosiota savupiipussa. (Sinnott & Towler 2009)

### 3.1.2 Pakkovetouunit

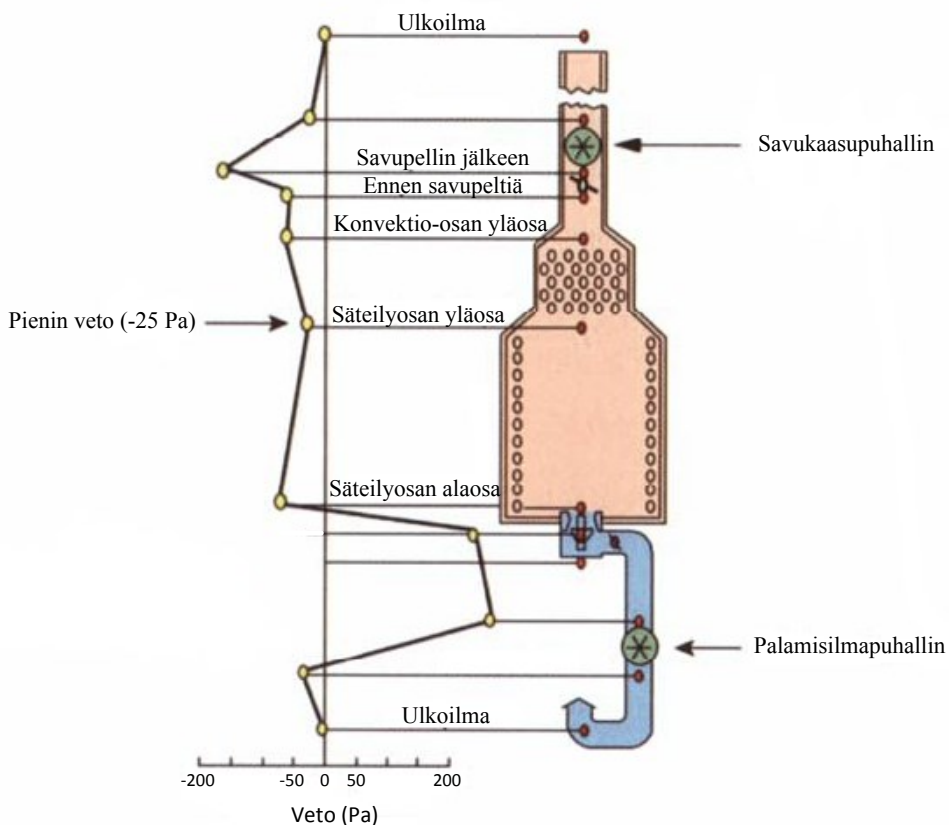
Pakkovetouuneissa käytetään luonnonvedon lisäksi puhaltimia, joilla saadaan parannettua ilman ja savukaasun kiertoa prosessiuunissa (Mullinger & Jenkins 2008). Puhaltimien käyttö mahdollistaa myös prosessiuunien sijoittamiseen paikkaan, jossa ei ole mahdollisuutta käyttää savupiippua tai savupiipulla ei saada riittävää vetoa aikaiseksi prosessiuuniin (Pansini & Smalling 2006). Pakkovetouunityyppit on esitetty kuvassa 6.

Imuedossa (kuva 6 b-kohta) savukaasujen virtausta parannetaan savukaasukanavaan sijoitetulla savukaasupuhaltimella. Savukaasupuhallin lisää uunin lämmönsiirto-osien vetoa, mikä mahdollistaa myös palamisilman esilämmittämisen savukaasuilla. Imuedossa haittapuolena on puhaltimen altistuminen kuumalle ja mahdollisesti likaiselle savukaasulle. Lisäksi puhaltimen avulla tuotettu suurempi alipaine lisää ilmapuutoriskiä prosessiuunin sisään.

Varsinaisessa pakkovetouunissa (kuva 6 c-kohta) puhallin on sijoitettu palamisilman kanavaan. Puhallin nostaa palamisilman painetta, mikä mahdollistaa suuremmat virtausnopeudet, polttoaineen ja ilman sekoittumisen sekä paremman lämmönsiirron prosessiuunissa. (Mullinger & Jenkins 2008) Pansinin & Smallingin mukaan paineistetun palamisilman seurauksena prosessiuunin sisälle muodostuu lievä ylipaine ja savupiipun alaosaan lievä alipaine. Liian alhaisella polttoilman paineella savupiipun luoma luonnollinen veto voi aiheuttaa myös osittaisen alipaineen prosessiuunin sisäpuolelle. Liian

suurella polttoilman paineella uuniin muodostuu selvä ylipaine (Pansini & Smalling 2006) Ylipaineessa olevasta systeemistä johtuen mahdolliset kuumat ja myrkylliset savukaasuvuodot virtaavat prosessiuunista ulos. (Mullinger & Jenkins 2008) Pakkovetouunien operoinnissa voidaan kuitenkin pyrkiä välttämään Pansinin & Smallingin esittämää lievästi ylipaineista savukaasukiertoa. Nesteen Porvoon jalostamolla myös pakkovetouuneja operoidaan niin, että prosessiuunin savukaasukierto on koko ajan hieman alipaineen puolella.

Tasapainotetun vedon uuneissa (kuva 6 d-kohta) yhdistyy imuvedon ja pakkovedon parhaat puolet. Palamisilmapuhaltimella pyritään saamaan hyvä virtaus polttimelle, kun taas savukaasupuhaltimella pyritään takaamaan riittävä imu uunin sisälle. Näin voidaan saavuttaa pakkovetouunin suorituskyky, mutta pitää silti uunin sisäinen paine lähellä ilmanpainetta vuotojen ehkäisemiseksi. (Mullinger & Jenkins 2008) Prosessiuunin paine pyritään koko ajan pitämään hiukan alipaineen puolella säätämällä puhaltimien kierrosnopeutta (Pansini & Smalling 2006). Tasapainotetun vedon ylläpito ja hallinta vaatii muita vetotekniikoita kehittyneemmän ohjausjärjestelmän. (Mullinger & Jenkins 2008)



**Kuva 12 Tasapainotetun vedon uunin paineprofiili (mukailtu: Institution of Chemical Engineers 2012).**

Kaasuvirtaus pakkovetouunissa ei eroa merkittävästi luvussa 3.1.1 esitetystä luonnonvetouunin mallista. Puhaltimet kuitenkin aiheuttavat paineen muutoksia palamisilma- ja kaasuvirtauksiin, mikä näkyy pakkovetouunin paineprofilissa. Tyypillinen tasapainotetun vedon uunin paineprofiili on esitetty kuvassa 12. Ilma tulee ensimmäisenä polttoilmanakanavaan, jossa puhallin nostaa ilmanpaineen selkeästi ylipaineen puolelle. Ilma virtaa ylipaineisena polttimelle menettäen osan paineestaan savukaasukanavan kitkahäviöiden vuoksi. Polttimessa ilma ja polttoaine muuttuvat savukaasuiksi sekä paine laskee alipaineen puolelle polttimen painehäviön takia. Säteilyosassa savukaasujen painehäviöt ovat lineaarisia luonnonvetouunin tapaan, ja paine-ero ulkoilmaan, on pienimmillään tulipesän yläosassa. Tämä johtuu siitä, että säteilyosaa ylöspäin mentäessä savukaasujen paine laskee hitaammin kuin ulkoilman paine samalla matkalla. Tulipesän yläosan vedon tavoitearvona voidaan pakkovetouuneillakin pitää 25 Pa alipainetta. Konvektiossa ja savukaasukanavan savupellin kohdalla uunin veto ja painehäviöt kasvavat. Ennen savukaasupuhallinta savukaasujen alipaine on suurimmillaan, mutta savukaasupuhaltimen paine nousee lähelle vastaavaa ilman painetta ja veto pienenee. Savupiipun ulostulossa savukaasujen paine on palautunut vastaamaan ulkoilman painetta ja kaikki ajava voima on kulunut. Kuten kuvan 12 paineprofilista voidaan huomata, vedon muutokset uunin eri osissa vastaavat melko hyvin kuvassa 11 esitettyä luonnonvetouunia. Savukaasupuhallin mahdollistaa prosessiuunin pitämisen alipaineisena luonnonvetouunin tapaan. Merkittävin ero pakkovetouunin ja luonnonvetouunin paineprofiilin välillä on palamisilman paineessa ja polttimen aiheuttamassa painehäviössä.

Trambouzen mukaan pakkovetouunien polttimet eivät kuitenkaan merkittävästi eroa luvussa 3.1.1 esitetyistä luonnonvetouunien poltintyypeistä. Palamisilmapuhaltimella varustetuissa uuneissa polttimen painehäviö on kuitenkin merkittävästi suurempi kuin luonnonvetopolttimissa, mutta vastaavasti myös maksimipoltinteho on suurempi. Pakkovetopolttimen painehäviöt voivat yltää noin 2500 Pa:iin ja poltintehot noin 80 MW:iin. (Trambouze 2000)

### **3.2 *Palamisprosessin ilmantarve***

Palamisreaktiossa polttoaineen kanssa reagoiva happi tuodaan polttimille palamisilman kanssa. Polttoaineen sisältämät komponentit reagoivat itsenäisesti hapen kanssa muo-

dostaen palamistuotteita ja vapauttaen lämpöä. Täydellisessä palamisessa polttoaineen ja ilman väliset reaktiot ovat:



Mikäli polttoaineen koostumus tiedetään, voidaan näiden reaktioyhtälöiden avulla päätellä polttoaineen komponenttien kulutus, savukaasujen koostumus sekä palamiseen tarvittava happimäärä. Tarvittavan hapen ainemäärän suhde palamisreaktion polttoaineen komponenttiin saadaan reaktioyhtälön kertoimista. (Wikstén 1995)

Palamisreaktioihin tarvittavan happimäärän avulla voidaan selvittää palamisprosessin ilmantarve ilman koostumuksen perusteella. Kuivan ilman koostumus on esitetty taulukossa 1. Ilma koostuu pääosin typestä ( $N_2$ ) ja hapestä ( $O_2$ ), mutta seoksessa on myös pieniä määriä hiilidioksidia ( $CO_2$ ) sekä jalokaasuja, kuten argonia (Ar). Täydellisessä palamisprosessissa ilman tyyppi, hiilidioksidi ja jalokaasut päätyvät savukaasuihin sellaisenaan reagoimatta hapen tai polttoaineen kanssa (Lampinen & Seppälä 2008).

**Taulukko 1 Kuivan ilman koostumus (mukailtu Lampinen & Seppälä 2008).**

Komponentti	Moolimassa (g/mol)	Mooliosuus (-)	Massaosuus (-)
$N_2$	28,013	0,7809	0,7553
$O_2$	31,999	0,2095	0,2314
Jalokaasut, Ar	39,948	0,0093	0,0128
$CO_2$	44,010	0,0003	0,0005

Reaktioyhtälöiden mukaisessa palamisessa savukaasuihin ei muodostu lainkaan vapaata happea. Tällöin kaikki ilman happi kuluu reaktiossa ja kyseessä on stoikiometrinen palaminen. (Lampinen & Seppälä 2008)

### 3.3 Ylimääräinen ilma

Luvussa 3.2 on määritelty palamisreaktioiden teoreettinen ilmantarve. Käytännössä palaminen tapahtuu kuitenkin stoikiometrisestä ilmamäärästä poikkeavalla ilmamäärällä.

Tällöin voidaan määritellä ilmakerroin, joka kuvaa todellisen ilmamäärän suhdetta stoikiometriseen ilmamäärään:

$$\lambda = \frac{n_i}{n_{i,st}} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2,st}} \quad (22)$$

Missä:

$n_i$	ilman todellinen ainemäärä (mol)
$n_{i,st}$	ilman stoikiometrinen ainemäärä (mol)
$n_{O_2}$	hapen todellinen ainemäärä (mol)
$n_{O_2,st}$	hapen stoikiometrinen ainemäärä (mol)

Stoikiometrisessä palamisessa  $\lambda = 1$ , mutta usein käytännössä kuitenkin  $\lambda > 1$  (Lampinen & Seppälä 2008). Käytännössä prosessiuuniin syötetään tarkoituksella ylimääräistä ilmaa, jotta palaminen saataisiin mahdollisimman täydelliseksi. Syynä ylimääräisen ilman tarpeeseen ovat polttoaineen ja palamisilman epätäydellinen sekoittuminen sekä mukautuminen polttoaineen koostumuksen ja ulkoilman tilan vaihteluihin. (Baukal & Bussman 2011) Luonnonvetouuneissa palamisilman virtausnopeus polttimille on pieni, minkä vuoksi polttoaineen ja ilman sekoittuminen on heikompaa. Tämän vuoksi luonnonvetouuneja joudutaan operoimaan usein 20–25 % stoikiometristä ilmamäärää suuremmalla ilmamäärällä. Sen sijaan pakkovetouuneissa ilman virtausnopeus on suurempi, ja ylimääräistä polttoilmaa tarvitaan vähemmän. Pakkovetouunien tyypillinen lisäilman tarve on noin 10 %. (Institution of Chemical Engineers 2012) Kun ilmakerroin ylittää teoreettisen arvon, kaikki happi ei kulu reaktiossa vaan savukaasuissa on vapaata happea (Lampinen & Seppälä 2008).

Palamisen ilmakerroin voidaan määrittää kokeellisesti mittaamalla savukaasuissa olevan hapen määrä. (Lampinen & Seppälä 2008). Baukalin & Bussmanin mukaan paras paikka savukaasujen happipitoisuuden mittaukselle on säteilyosan yläosassa. Säteilyosan yläosassa savukaasut ovat riittävän kaukana polttimista ja palamista ei pitäisi enää tapahtua. Täten happi ja reaktiotuotteet ovat saavuttaneet palamisreaktion jälkeisen tasapainokonsentraation. Säteilyosan yläosan mittauksella vältetään myös mittausvirheet, joita konvekti-osan ilmavuodoista voi aiheutua. Konvektio-osassa on tyypillisesti säteilyosaa enemmän läpivientejä, minkä vuoksi vuotoilmaa voi päästä enemmän savukaasujen joukkoon. Vuotoilma nostaa savukaasujen happipitoisuutta, minkä vuoksi mittaus

vuotokohtien jälkeen ei täysin kerro palamisprosessin todellisesta ilmamäärästä. (Baukal & Bussman 2011)

Ylimääräisellä ilmalla on suuri merkitys prosessiuunin hyötysuhteeseen sekä polttoaineen kulutukseen. Viileän ilman virtaaminen tulipesään laskee polttimien liekkien lämpötila ja heikentää lämmönsiirtoa prosessiaineeseen. Polttimien liekkien lämpötilan laskiessa liian alhaiseksi palaminen voi muuttua epätäydelliseksi, jolloin alkaa muodostuma hiilimonoksidia ja lämpöä vapautuu palamisreaktiossa vähemmän. Ylimääräinen ilma kuumenee tulipesässä palamistuotteita vastaavaan lämpötilaan ja sekoittuu savukaasuihin. Ilma virtaa savukaasujen mukana lämmönsiirto-osien läpi luovuttaen kuitenkin osan lämpöenergiastaan prosessiaineeseen. Ilma poistuu savupiipusta savukaasujen lämpötilassa ja vie näin osan polttoaineesta saadusta lämpöenergiasta ulkoilmaan. Täten savupiipusta tulevan kaasun massavirta on suurempi ja myös prosessiuunista poistuva lämpöteho on suurempi. Näiden haittojen kompensoimiseksi joudutaan polttimelle syöttämään lisää polttoainetta. Mullinger & Jenkinsin mukaan ylijäämä hapen nosto 2 %:sta 5 %:iin voi lisätä polttoaineen kulutusta jopa 10 %. (Mullinger & Jenkins 2008) Liekin lämpötilaa voidaan myös laskea tarkoituksellisesti ylijäämäilmalla. Kylmempi ja lyhyempi liekki vähentää tulipesän tuubien altistumista liian suurelle lämpöteholle ja helpottaa operoimista vähentämällä ylikuumentumisen riskiä. (Ahamad & Vallavanatt 2012)

Liebermanin mukaan ylimääräisen ilman määrä tulisi kuitenkin optimoida täydellisen palamisen suhteen. Ilmakertoimen minimoinnilla voidaan hukata paljon energiaa, vaikka ylijäämäilmaa ei olisikaan. Polttimille tuotavaa ilmavirtaa säädettyäessä, polttoainevirran pysyessä vakiona, on mahdollista löytää optimipiste, jossa prosessiaineeseen absorboitunut teho on maksimissaan. Ilmavirran kasvattaminen tai vähentäminen optimipisteen ympärillä vähentää välittömästi myös absorboitunutta tehoa. Täydelliseen palamiseen vaadittava optimimaalinen happipitoisuus vaihtelee prosessiuunin toimintakarakteristiikan mukaan. Happipitoisuudelle asetetaan uunikohtainen tavoitearvo, johon uunin operoinnissa pyritään. (Lieberman 2009) Tavoitearvon seuraamiseksi palamisprosessiin syötetyn ylijäämäilman määrä ja ilmakerroin voidaan laskea kolmen eri mittaustekniikan perusteella: polttoaine- ja ilmavirtausmittauksilla, ylijäämähapen mittauksilla savukaasuista sekä näiden yhdistelmällä (Mullinger & Jenkins 2008).

Erityisesti savukaasuanalyysissä epätarkkuutta aiheuttaa kuitenkin ulkoilman vuotaminen prosessiuuniin. Vuodoista tulevan ulkoilman takia savukaasuanalyysissä on selkeästi korkeampi happipitoisuus kuin polttimille tulevasta ylijäämäilmasta tulisi aiheutua. Jos vuodot ovat suuria, savukaasuanalyysin tulkintavirheet voivat johtaa uunin operointiin liian alhaisella syöttöilmamäärällä. Tällöin ilmakerroin voi pudota alle stoikiometrisen arvon,  $\lambda < 1$ . (Mullinger & Jenkins 2008)

Käytettäessä virtausmittausten ja savukaasuanalyysin yhdistelmää voi ilmakertoimen laskennassa ilmetä tasetäsmäysongelma. Mikäli prosessiuunissa ei ole ilmavuotoja, ainevirrat prosessiuunin polttimille ja prosessiuunista ulos tulisivat olla yhtä suuria. Kuitenkin mittalaitteiden epätarkkuudesta johtuen savukaasuanalyysi ja virtausmittaus voivat antaa toisistaan poikkeavia tuloksia, jolloin todellisen ilmakertoimen määrittäminen on hankalaa. Nesteen Porvoon jalostamolla polttokaasun massavirtaa mitataan pääosin Coriolis-massavirtamittareilla tai paine-eron mittaukseen perustuvilla laippamittareilla. Näiden laitteiden mittaustarkkuus vaihtelee laitetyypin ja mittausalueen mukaan välillä  $\pm 0,21$ – $1,08$  %. (Neste Oil 2015b) Porvoon jalostamon prosessiuuneista mitataan märän savukaasun koostumusta. Savukaasuanalyysiaattoreiden mittaustarkkuus on  $\pm 2$  % mittausalueesta (Torkkel 2015).

## 4 Ilmavuodot

Prosessiounit eivät koskaan ole täysin ilmatiiviitä. Etenkin vanhoissa, pitkään käytössä olleissa uuneissa voi olla runsaasti aukkoja, joista kaasua pääsee virtaamaan läpi. (Baukal & Bussman 2011) Alipaineisessa uunissa ulkoilma pyrkii vuotamaan uunin sisään, kun taas ylipaineisessa uunissa savukaasut virtaavat ulospäin (Mullinger & Jenkins 2008). Tässä luvussa keskitytään kuitenkin pääosin savukaasukierroltaan alipaineessa toimiviin prosessiuuneihin sekä sisäänpäin virtaavien ilmavuotoihin ja niiden vaikutuksiin.

### 4.1 *Vaikutus prosessiuunin toimintaan*

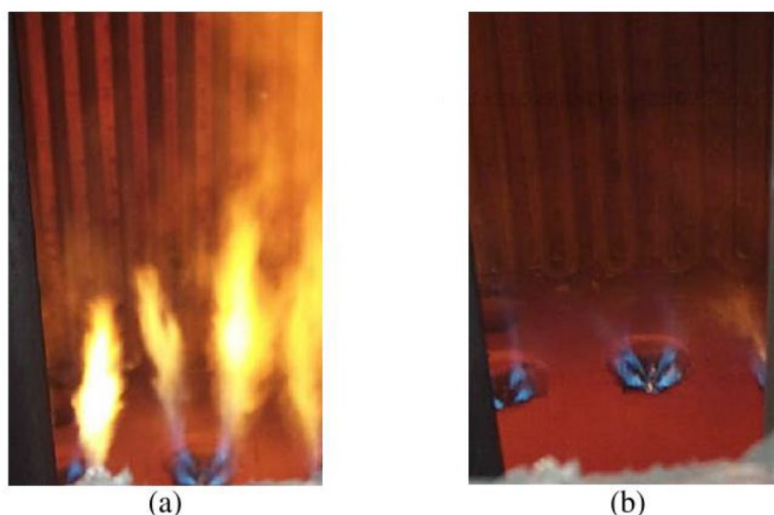
Ilmavuodot aiheuttavat monia ongelmia prosessiuunin toiminnalle. Yksi tärkeimmistä ja selkeästi havaittavista vaikutuksista on uunin hyötysuhteen pieneneminen. Luvussa 3.3 on esitetty ylimääräisen palamisilman vaikutus lämpöhäviöihin. Ylimääräisen palamisilman tapaan myös vuotoilma joudutaan lämmittämään prosessiuunissa savukaasujen lämpötilaan, mikä vähentää prosessiaineeseen absorboituneen lämpötehon määrää. Vuotoilman aiheuttama lämpöhäviö on yhtä suuri kuin lämpöteho, joka vaaditaan lämmittämään vastaava määrä ilmaa ulkoilman lämpötilasta savupiipusta poistuvien savukaasujen lämpötilaan. Täten ilman lämmityksestä aiheutuvat lämpöhäviöt ovat sitä suuremmat mitä enemmän ylimääräistä ilmaa prosessiuunissa on ja mitä korkeampi on savupiipusta poistuvien savukaasujen lämpötila. Etenkin korkeilla savukaasujen lämpötiloilla jo pienikin muutos ilmakertoimessa voi vaikuttaa merkittävästi uunin hyötysuhteeseen. Ilmavuotojen ja ylimääräisen palamisilman vaikutukset hyötysuhteeseen riippuvat myös ulkoilman ominaisuuksista. Uunin vedon pysyessä vakiona kylmemmän ulkoilman massavirta uuniin on suurempi kuin lämpimän, sillä ulkoilman tiheys kasvaa lämpötilan laskiessa. Lisääntyneen massavirran ja alhaisemman lämpötilan vuoksi ilmavuotojen merkitys korostuu kylmässä ilmastossa. (Baukal & Bussman 2011)

Ulkoilman epätoivottu vuotaminen vaikuttaa myös palamisessa syntyviin päästöihin. Hyötysuhteen pienentymisen takia samaan lämpötehoon pääsemiseksi joudutaan käyttämään enemmän polttoainetta, mikä lisää syntyvien savukaasujen määrää. Lisäksi liiallinen happipitoisuus prosessiuunissa mahdollistaa ilman typpimolekyylin reagoimisen ylijäämä hapen kanssa. Reaktiotuotteena syntyy epätoivottuja typen oksideita ( $\text{NO}_x$ ). Typen oksideita on havaittu muodostuvan etenkin riittävän ylijäämähapen ja korkean liekin lämpötilan yhteisvaikutuksena. Ilmamäärän kasvaessa yhä suuremmaksi poltti-



men liekin lämpötila laskee ja typen oksidien muodostuminen vähenee. (Baukal & Bussman 2011)

Ilmavuodot voivat vaikuttaa prosessiuunin polttimien suorituskykyyn epäsuorasti. Mittattaessa savukaasujen happipitoisuutta ei pystytä tarkasti määrittämään mistä ylimäärähappi on peräisin. Näin ollen happimittaus ei suoraan kerro polttimien läpi tulevan ilman määrää. Jos uunin säteilyosaan vuotaa runsaasti ulkoilmaa, savukaasujen happimitaukset voivat olla hyväksyttävissä rajoissa, vaikka polttimien kautta ei virtaisikaan palamiseen tarvittavaa määrää ilmaa. Tällöin palaminen on epätäydellistä ja polttimen liekki on huonolaatuinen. Kuvassa 13 on esitetty prosessiuunin polttimien liekit savukaasujen ylimäärähappipitoisuuksilla alle 0,5 % ja 1,5 %. Alle 0,5 % ylimäärähappipitoisuudella polttimelle virtaa selkeästi liian vähän ilmaa. Liian vähäisen ilmamäärän takia liekki on pitkä ja sen kärjet hehkuvat keltaisena palamattoman hiilen takia. Pidentynyt liekki voi altistaa konvektio-osan tuubit säteilylle ja mahdollisesti aiheuttaa vaurioita. Epätäydellinen palaminen vaikuttaa itsessään myös negatiivisesti prosessiuunin polttoaineen kulutukseen sekä hyötysuhteeseen, sillä lämpöä saadaan polttoaineesta vähemmän kuin täydellisessä palamisessa. Kuvan 13 b-kohdassa on vertailukohtana polttimen liekki 1,5 % ylimäärähappipitoisuudella. Tässä tapauksessa polttimelle virtaa riittävästi ilmaa ja liekki on hyvälaatuinen. (Baukal & Bussman 2011)



**Kuva 13** Prosessiuunin polttimien liekit eri savukaasujen ylijäämähapen arvoilla: a)  $< 0,5\% \text{ O}_2$  ja b)  $1,5\% \text{ O}_2$  (Baukal & Bussman 2011).

Epätäydellisen palamisen seurauksena syntyy palamistuotteita, jotka voivat edelleen reagoida ilman hapen kanssa. Tällaisia palamistuotteita ovat muun muassa hiilimonoksidi (CO) ja palamattomat hiilivedyt. Nämä palamistuotteet poistuvat kuumina tuli-

pesästä savukaasujen mukana. Ilmavuodoista johtuen prosessiuunin sisäpuolella voi olla ylimääräistä happea esimerkiksi konvektio-osassa. Kun kuumat ja osittain palamatta jääneet aineet kohtaavat ylimääräisen hapen, voivat ne syttyä. Tätä ilmiötä kutsutaan jälkipoltoksi. Jälkipolton edellytyksenä on epätäydellisten palamistuotteiden korkea lämpötila sekä palamistuotteiden hyvä sekoittuminen ilman hapen kanssa. Jälkipoltossa vapautuva lämpö voi vahingoittaa prosessiuunin, mikäli jälkipoltto tapahtuu osassa, jota ei ole suunniteltu palamisreaktioille. Tämä voi muuttaa myös uunin lämpötilajakaumaa ja siten aiheuttaa vaikeuttaa prosessiaineen lämmittämisen kontrollointia. Jälkipolton aiheuttamat vauriot voivat johtaa suunnittelemattomiin huoltotöihin ja alasajoihin. (Baukal & Bussman 2011)

Ilman vuotaminen prosessiuuniin aiheuttaa myös lukuisia muita haittoja, joiden havaitseminen voi tapahtua vasta pidemmän ajan kuluessa. Ilmavuodon viilentävä vaikutus voi aiheuttaa uunin tuubeille lämpötilavaihtelua ja termisiä jännityksiä. Lisäksi hapen joutuminen kosketuksiin tuubien kanssa saattaa aiheuttaa metallisten tuubien hapettumisen. Nämä haitat heikentävät tuubien kestävyyttä ja lisäävät huoltokustannuksia. Ilman vuotaminen uuniin voi aiheuttaa myös ylimääräistä likaantumista, kuonan muodostumista sekä hiilipitoisen tuhkan syntyä. (Baukal & Bussman 2011)

## **4.2 Ilmavuotojen arviointi laskennallisesti**

### **4.2.1 Ilmavuotojen virtausteknisen laskennan perusteet**

Ilman virtaukselle uuniin vuotokohdissa pätevät virtausmekaniikan lainalaisuudet. Massan säilymislain ja termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön perusteella virtaavan aineen massavirta ja energia säilyy vakiona, mikäli virtaukseen ei tuoda tai poisteta lämpöä tai työtä (Vedavarz et al. 2007). Puristumattomalle ja kitkattomalle virtaukselle säilymislaia voidaan kirjoittaa Bernoullin yhtälön muotoon:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g H_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g H_2 = \text{vakio} \quad (23)$$

Missä:

$p_i$	staattinen paine (Pa)
$\rho$	tiheys (kg/m <sup>3</sup> )

$v_i$	virtausnopeus (m/s)
$g$	putoamiskiihtyvyys ( $\text{m/s}^2$ )
$H_i$	tarkasteltavan pisteen korko referenssipisteestä (m)

Yhtälö osoittaa staattisen paineen energian, kinemaattisen energian ja potentiaalienergian olevan vakio virtauksen virtaviivalla. Todellisessa virtauksessa mekaaninen energia ei kuitenkaan pysy vakiona vaan tapahtuu dissipaatiota. Dissipaatiossa mekaaninen energia muuttuu vastusvoimien seurauksena lämmöksi. Vastusvoimat voidaan ottaa huomioon lisäämällä painehäviötermi Bernoullin yhtälöön. (Vedavarz et al. 2007) Tällöin yhtälö saadaan muotoon:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g H_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g H_2 + \Delta p \quad (24)$$

Missä:

$\Delta p$	vastusvoimista aiheutuva painehäviö (Pa)
------------	--

Painehäviöitä virtaukselle aiheuttavat erilaiset vastusvoimat, jotka voidaan käytännössä jakaa virtaavan aineen ja kanavan seinämän väliseen kitkaan sekä virtauskanavan kerta-  
vastuksiin. Virtauskitka aiheuttaa painehäviöitä koko virtauksen matkalla, minkä vuoksi kitkapainehäviön suuruus on suoraan verrannollinen tarkasteltavan virtausmatkan pituuteen. Painehäviöihin vaikuttaa oleellisesti myös virtaavan aineen ja kanavan pinnan välinen kitkakerroin  $f$ , joka riippuu virtauksen pyörteisyydestä (Reynoldsin luku) sekä kanavan pinnan karheudesta. (Lampinen et al. 2010) Kitkapainehäviöt voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta p_f = f \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (25)$$

Missä:

$f$	Darcyn kitkakerroin (-)
$l$	virtaavan aineen kulkema matka (m)
$D$	kanavan halkaisija (m)
$\rho$	aineen tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )
$v$	virtausnopeus (m/s)

Kertavastukset aiheuttavat painehäviöitä paikallisesti. Kertavastuksia ovat tyypillisesti virtauskanavan muutokset, kuten mutkat, venttiilit ja laajenemat. Jokaiselle kertavastukselle voidaan määritellä ominainen kertavastuskerroin  $\zeta$ , joka riippuu pääosin vastuksen muodosta, mutta myös hieman virtauksen pyörteisyydestä. Kappaleen kertavastuskerroin on ominainen vain tietyssä pisteessä määritetylle nopeudelle, minkä vuoksi taulukoituja kertoimia käytettäessä on myös virtausnopeus valittava määritelmän vaatimasta paikasta. (Lampinen et al. 2010) Kertavastuksen aiheuttama painehäviö lasketaan kaavalla:

$$\Delta p_k = \zeta \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (26)$$

Missä:

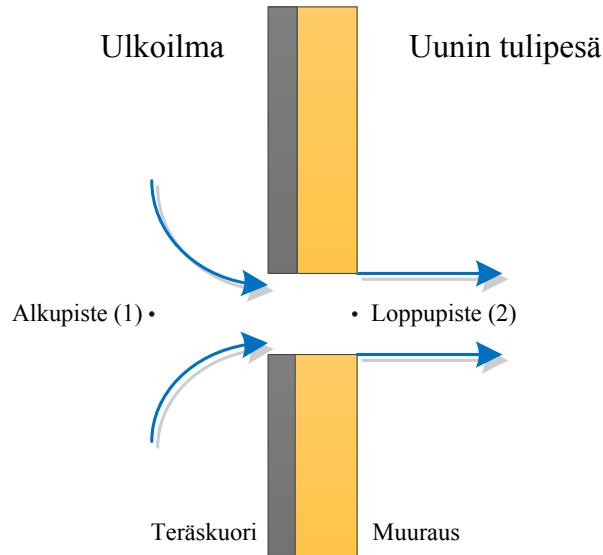
$\zeta$	kertavastuskerroin (-)
$\rho$	aineen tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$v$	virtausnopeus (m/s)

Virtauksen kokonaispainehäviö tarkasteltavien pisteiden välillä koostuu kanavan kitkاپainehäviöiden ja mahdollisten kertavastusten summasta:

$$\Delta p = f \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 + \sum_i \zeta_i \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (27)$$

Kun kaava (27) sijoitetaan Bernoullin yhtälöön (24), saadaan pisteiden 1 ja 2 väliseksi virtauksen energian säilymislaiksi:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g H_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g H_2 + f \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 + \sum_i \zeta_i \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (28)$$



**Kuva 14 Ilman virtaus prosessiuunin vuotokohdan läpi.**

Painehäviöillä täydennettyä Bernoullin yhtälöä (28) voidaan soveltaa myös ilmavirran laskemiseen prosessiuunin vuotokohdan läpi. Kuvassa 14 on esitetty periaatekuva ilma-vuodon virtaustilanteesta. Tarkastelun alkupiste voidaan asettaa uunin ulkopuolelle vuotokohdan suulle ja loppupiste uunin sisäpuolelle vuotokohdan ulostuloon. Korkeuden muutos vuotokohdan yli voidaan olettaa mitättömäksi, minkä vuoksi potentiaalienergian termit voidaan jättää huomiotta. Oletetaan myös, että ilma ei lämpene läpivirtauksen aikana ja että ilman tiheys pysyy näin ollen vakiona. Ulkoilman voidaan olettaa olevan levossa, joten alkupisteessä energia on varastoinut vain staattiseksi paineeksi. Prosessiuunin sisäpuolella staattinen paine on pienempi, joten Bernoullin yhtälön perusteella virtausnopeuden tulee kasvaa. Tarkastelupisteiden välinen staattinen paine-ero muuttuu virtauksen dynaamiseksi paineeksi sekä painehäviöiden seurauksena lämmöksi. Tehtyjen oletusten perusteella voidaan ilman nopeudelle vuotokohdan ulostulossa kirjoittaa kaava:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2 - \Delta p)}{\rho_2}} \quad (29)$$

Ilmavirran tilavuusvirta vuotokohdassa, uunin sisäpuolella saadaan ilmavirran nopeuden ja vuotokohdan poikkipinta-alan tulona. Tällöin saadaan vuotoilman tilavuusvirraksi:

$$\dot{V}_2 = A_{\text{vuotokohta}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2 - \Delta p)}{\rho_2}} \quad (30)$$

Missä:

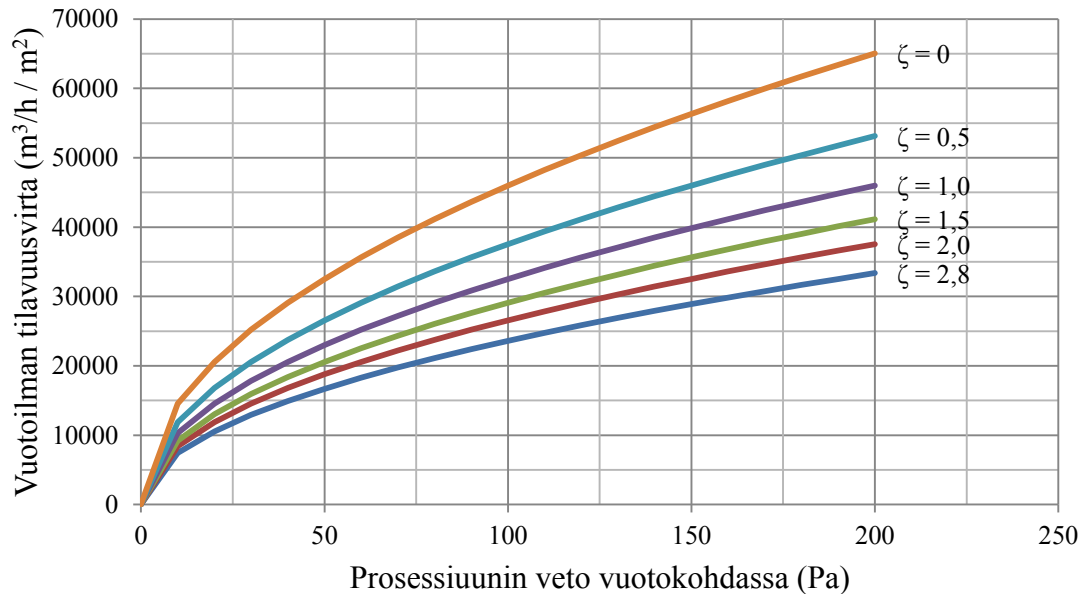
$A_{\text{vuotokohta}}$	vuotokohdan poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ )
$p_1$	ulkoilman paine (Pa)
$p_2$	paine uunin sisäpuolella (Pa)
$\Delta p$	virtauksen painehäviö (Pa)
$\rho_2$	ilman tiheys uunin sisäpuolella ( $\text{kg/m}^3$ )

Vuotoilman virtauksen vastusvoimista aiheutuva painehäviö määritetään kaavoilla (25) ja (26). Mikäli uunin teräskuori ja sisäpuolinen muuraus ovat ohuita, voidaan olettaa että varsinaista kitkapainehäviötä ei synny vaan läpivirtaus tapahtuu kertavastuksena. Kotiaho et al. esittävät seinämän läpivirtaukselle kertavastuskertoimia  $\zeta = 1,1-2,8$  läpivirtausaukon muodosta riippuen. Näitä kertavastuskertoimia käytettäessä virtausnopeutena on käytettävä ulosvirtausaukon poikkipinnan perusteella laskettua keskimääräistä nopeutta. (Kotiaho et al. 2004) Tämän oletuksen perusteella kirjoitetaan yhtälön (30) painehäviötermi  $\Delta p$  kertavastuksena, ja erotetaan virtauksen tarkastelupisteiden välinen paine-ero omaksi termikseen. Tällöin saadaan ilmavuodon tilavuusvirralle kaava:

$$\dot{V}_2 = A_{\text{vuotokohta}} \sqrt{\frac{2}{\rho(1+\zeta)}} \sqrt{p_1 - p_2} \quad (31)$$

Kaavassa (31) alkupisteen ja loppupisteen välinen paine-ero ( $p_1 - p_2$ ) tarkoittaa käytännössä prosessiuunin vetoa vuotokohdassa. Kaavan avulla voidaan siis määrittää vuotoilman tilavuusvirta, kun tiedetään uunin veto vuotoaukon korkeudella sekä vuotoaukon pinta-ala ja kertavastuskerroin. Kuvassa 15 on esitetty vuotoilman tilavuusvirta pinta-alayksikköä kohden prosessiuunin vedon funktiona. Kuvaajaan on piirretty käyrät eri kertavastuskertoimille kuvaamaan vuotoaukon virtausvastuksen vaikutusta vuotoilmanmäärään. Kuvaajasta voidaan huomata vuotoilman tilavuusvirran olevan sitä suurempi, mitä suurempi on uunin veto ja mitä pienempi on kertavastuskerroin. Hyvin pienen vedon alueella (0–10 Pa) tilavuusvirran muutos on selkeästi suurinta suhteessa vedon muutokseen. Vedon kasvaessa suuremmaksi tilavuusvirran muutos pienenee. Käyrien muoto on kaikilla kertavastuskertoimilla samanlainen. Kertavastuskertoimen vaikutus vuotoilman tilavuusvirtaan on suurinta kertavastuskertoimen ollessa pieni. Esimerkiksi kertavastuskertoimen muuttuessa arvosta 0 arvoon 0,5 tilavuusvirtojen erotus on

suurempi kuin kertavastuskertoimen muuttuessa arvosta 1,5 arvoon 2,0, vaikka kertavastuskertoimen absoluuttinen muutos onkin yhtä suuri.



**Kuva 15 Vuotoilman tilavuusvirta prosessiuunin vedon funktiona eri kertavastuskertoimen  $\zeta$  arvoilla. Ilman tiheys  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  (15 °C).**

Kotiahon et al. esittämistä kertavastuskertoimista voidaan pyrkiä valitsemaan kutakin vuotoaukkoa parhaiten kuvaavat kertoimet. Kuvan 14 kaltaiselle vuotoaukolle, jossa on yksinkertaiset kartioimattomat sisään- ja ulostulot, voidaan käyttää Kotiahon et al. mukaan kerrointa  $\zeta = 1,5$ . (Kotiaho et al. 2004)

Storm & Guffre esittävät artikkelissaan kaavan (31) muunnoksen, jossa kertavastuskertoimen on korvattu purkautumiskertoimella  $C_d$  :

$$\dot{V}_2 = A_{\text{vuotokohta}} C_d \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_1 - p_2} \quad (32)$$

Missä:

$A_{\text{vuotokohta}}$	vuotokohdan poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ )
$C_d$	purkautumiskerroin (0,61)
$p_1$	ulkoilman paine (Pa)
$p_2$	paine uunin sisäpuolella (Pa)
$\rho$	ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

Kaavassa (32) on määritelty purkautumiskertoimeksi 0,61, joka pätee levyssä oleville määrätyn muotoisille aukoilta, kuten ikkunoille, ilmanvaihtokanaville ja mittauslaippojen aukoilta. Varsinaista aukon muotoa ei ole kuitenkaan tarkemmin määritelty. Kaavaa voidaan käyttää ilmapuotojen yksinkertaiseen arvioimiseen, jos tiedetään vuotoaukon poikkipinta-ala. (Storm & Guffre 2010)

Kaavojen (31) ja (32) avulla voidaan johtaa yhteys kertavastuskertoimen  $\zeta$  ja purkautumiskertoimen  $C_d$  välille, mikä mahdollistaa yllä esitetyn purkautumiskertoimen muuntamisen kertavastuskertoimeksi ja kaavan (31) käyttämisen. Kertavastuskertoimen ja purkautumiskertoimen välille saadaan kaava:

$$\zeta = \frac{1}{C_d^2} - 1 \quad (33)$$

Kaavan perusteella saadaan purkautumiskerrointa  $C_d = 0,61$  vastaavaksi kertavastuskertoimeksi  $\zeta = 1,69$ , joka on melko lähellä myös Kotiahon et al. esittämää kertavastuskerrointa  $\zeta = 1,5$ .

Crane esittää teoksessaan vastaavan yhtälön (32) kuin Storm & Guffre, mutta käyttää purkautumiskertoimen sijasta nimitystä virtauskerroin  $C$ . Samalla on esitetty käyrästöt virtauskertoimien määrittämiseen mittauslaippojen aukoilta, erilaisille yhteille ja ventuureille. Näistä mittauslaippojen aukkojen voidaan olettaa kuvaavan parhaiten etenkin prosessiuunin tarkastusluukkujen vuotoaukkoja. Virtauskertoimet on määritetty Reynoldsin luvun funktiona eri mittauslaipan aukon ja kanavan halkaisijoiden suhteille. Laipan aukon ja kanavan halkaisijoiden suhde on määritelty kaavalla:

$$\beta = \frac{d_1}{d_2} \quad (34)$$

Missä:

$d_1$	mittauslaipan aukon halkaisija
$d_2$	virtauskanavan halkaisija

Prosessiuunien vuotoaukot ovat pääosin hyvin kapeita ja vastaavasti vuotoaukkoa edeltävänä kanavana toimii ulkoilma. Täten voidaan olettaa, että halkaisijoiden suhde  $\beta$  lä-



henee nollaa. Cranen käyrästä pienimmällä halkaisijoiden suhteella  $\beta = 0,20$  virtauskerroin saa arvon 0,60, ja pysyy likimain vakiona riippumatta Reynoldsin luvusta. Sen sijaan suuremmilla  $\beta$ :n arvoilla Reynoldsin luku vaikuttaa enemmän virtauskerroimen arvoon. Käyttämällä kaavaa (33) saadaan virtauskerroimen arvoa  $C = 0,60$  vastaavaksi kertavastuskerroimen arvoksi noin 1,78. (Crane 2009)

#### 4.2.2 Laskenta savukaasu- ja palamisilmamittausten perusteella

Alipaineiseen prosessiuuniin virtaavan vuotoilman määrä voidaan arvioida laskennallisesti savukaasuanalyysin ja palamisilmavirran perusteella. Polttimille syötetty palamisilmavirta voidaan etenkin pakkovetouuneissa mitata palamisilmakanavasta tai määrittää puhallinkäyrän avulla. Luvussa 3.2 esitettyjen palamisreaktioiden perusteella voidaan laskea tarvittava stoikiometrinen ilmamäärä, ja määrittää ilmakerroin  $\lambda$ . Jos  $\lambda < 1$  ja savukaasuissa on ylimääräistä happea, ilmavuotoja on prosessiuunissa varmasti. (Mullinger & Jenkins 2008)

Vuotoilmavirran määrittäminen voidaan tehdä uunin typpi- ja happitasapainon avulla. Typpi voidaan olettaa inertiksi eli reagoimattomaksi kaasuksi, sillä typen reaktioissa syntyvien oksidien  $\text{NO}_x$  osuus savukaasuista on tyypillisesti alle 100 ppm, kun taas typpikaasun  $\text{N}_2$  osuus on noin 70–80 % (Väänänen 2015). Typen oksidien osuus savukaasuista on siis häviävän pieni, joten typen massavirta uunin sisään ja uunista ulos voidaan olettaa stationääritilanteessa vakioiksi. Typeä virtaa uunin sisään palamisilman, polttoaineen ja vuotoilman mukana. Palamisilman mukana tulleen typen massavirta saadaan laskettua, kun tiedetään palamisilman massavirta ja ilman koostumus. Ilman koostumus on esitetty luvussa 3.2 taulukossa 1. Polttoaineen mukana tuleva typpi saadaan myös määritettyä polttoainevirran ja koostumuksen perusteella. (Mullinger & Jenkins 2008) Tulipesään johdetun typen määrä voidaan laskea kaavoilla:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ palamisilma}} = \dot{m}_{\text{Palamisilma}} w_{N_2 \text{ ilma}} \quad (35)$$

$$\dot{m}_{N_2 \text{ Polttoaine}} = \dot{m}_{\text{Polttoaine}} w_{N_2 \text{ Polttoaine}} \quad (36)$$

Missä:

$\dot{m}_i$	aineen i massavirta (kg/s)
$w_{N_2 i}$	typen massaosuus seoksessa i

Vuotoilman koostumus on sama kuin palamisilman, joten typen osuus vuotoilman määrästä tiedetään. Näin ollen ilmavuotona tuleen typen määrä on:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ vuotoilma}} = \dot{m}_{\text{Vuotoilma}} w_{N_2 \text{ ilma}} \quad (37)$$

Prosessiuunin sisään virtaavan typen kokonaismäärä saadaan laskettua tulipesään johdetun typen ja vuototypen summana:

$$\dot{m}_{N_2} = \dot{m}_{N_2 \text{ palamisilma}} + \dot{m}_{N_2 \text{ Polttoaine}} + \dot{m}_{N_2 \text{ vuotoilma}} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{N_2} &= \dot{m}_{\text{Palamisilma}} w_{N_2 \text{ ilma}} + \dot{m}_{\text{Polttoaine}} w_{N_2 \text{ Polttoaine}} \\ &+ \dot{m}_{\text{Vuotoilma}} w_{N_2 \text{ ilma}} \end{aligned} \quad (39)$$

Savukaasuanalyysillä voidaan määrittää savukaasujen koostumus. Savukaasujen typen massaosuuden avulla saadaan laskettua savukaasujen massavirta:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{Savukaasu}} &= \frac{\dot{m}_{N_2}}{w_{N_2 \text{ savukaasu}}} \\ &= \frac{\dot{m}_{\text{Palamisilma}} w_{N_2 \text{ ilma}} + \dot{m}_{\text{Polttoaine}} w_{N_2 \text{ Polttoaine}} + \dot{m}_{\text{Vuotoilma}} w_{N_2 \text{ ilma}}}{w_{N_2 \text{ savukaasu}}} \end{aligned} \quad (40)$$

Prosessiuunin happitasapainon avulla saadaan muodostettua toinen yhtälö vuotoilman massavirralle. Savukaasussa oleva ylijäämähappi on peräisin ylimääräisestä palamisilmasta tai vuotoilmasta. Tällöin ylijäämäilma on tulipesään syötetyn ilman ja vuotoilman summa vähennettynä palamiseen käytetyllä ilmalla:

$$\dot{m}_{\text{Ylijäämäilma}} = \dot{m}_{\text{Palamisilma}} + \dot{m}_{\text{Vuotoilma}} - \dot{m}_{\text{Stoikiometrinen ilma}} \quad (41)$$

Koska ilman ja savukaasujen koostumus tiedetään, voidaan määrittää sekä hapen osuus ylimääräisessä ilmassa että hapen osuus savukaasuissa. Ylijäämähappi ei reagoi prosessiuunissa, ja sen massavirta sisään uuniin sekä ulos uunista on stationääritilanteessa vakio:

$$\dot{m}_{\text{Ylijäämäilma}} w_{O_2 \text{ ilma}} = \dot{m}_{\text{Savukaasu}} w_{O_2 \text{ savukaasu}} \quad (42)$$

$$w_{O_2\text{ilma}} (\dot{m}_{\text{Palamisilma}} + \dot{m}_{\text{Vuotoilma}} - \dot{m}_{\text{Stoikiometrinen ilma}}) = w_{O_2\text{savukaasu}} \left( \frac{\dot{m}_{\text{Palamisilma}} w_{N_2\text{ ilma}} + \dot{m}_{\text{Polttoaine}} w_{N_2\text{ polttoaine}} + \dot{m}_{\text{Vuotoilma}} w_{N_2\text{ ilma}}}{w_{N_2\text{ savukaasu}}} \right) \quad (43)$$

Missä:

$\dot{m}_i$	aineen i massavirta (kg/s)
$w_{N_2 i}$	typen massaosuus seoksessa i
$w_{O_2 i}$	hapen massaosuus seoksessa i

Ylijäämähapen taseesta (40) voidaan ratkaista vuotoilman massavirta:

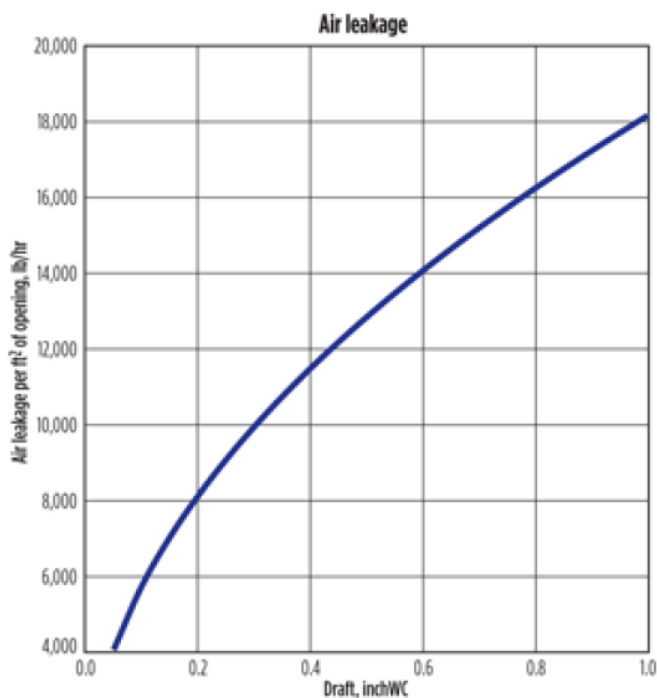
$$\dot{m}_{\text{Vuotoilma}} = \frac{\frac{w_{O_2\text{savukaasu}}}{w_{N_2\text{savukaasu}}} (\dot{m}_{\text{Palamisilma}} w_{N_2\text{ ilma}} + \dot{m}_{\text{Polttoaine}} w_{N_2\text{ polttoaine}})}{w_{O_2\text{ ilma}} - \frac{w_{N_2\text{ ilma}} w_{O_2\text{savukaasu}}}{w_{N_2\text{savukaasu}}}} - \frac{w_{O_2\text{ ilma}} (\dot{m}_{\text{Palamisilma}} - \dot{m}_{\text{Stoikiometrinen ilma}})}{w_{O_2\text{ ilma}} - \frac{w_{N_2\text{ ilma}} w_{O_2\text{savukaasu}}}{w_{N_2\text{savukaasu}}}} \quad (44)$$

(Mullinger & Jenkins 2008)

Ilmavuotojen laskenta tämän menetelmän avulla voi kuitenkin käytännössä olla mahdollonta ainakin vanhoille uuneille. Vanhoissa uuneissa instrumentointi voi olla puutteellista, minkä vuoksi ei kaikkia kaavassa (44) tarvittavia suureita pystytä mittaamaan. Etenkään savukaasujen typpipitoisuutta sekä palamisilman massavirtaa ei välttämättä mitata kaikista uuneista.

#### 4.2.3 Ilmavuotojen arviointikäyrät

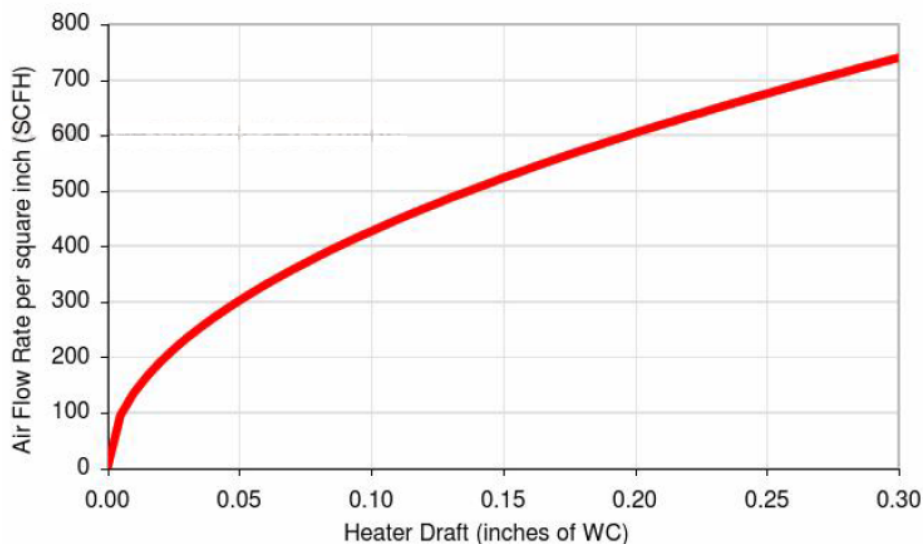
Prosessiuunien ilmavuotojen suuruutta voidaan arvioida kirjallisuudessa esitettyjen käyrästäjien perusteella. Käyrät on tyypillisesti laskettu tietyin oletusarvoin ja mahdollisesti käytetty myös kokemuseräistä tietoa esimerkiksi vuotokohtien kertavastuskertoimien määrittämisessä. Käyrissä on tavallisesti esitetty vuotoilmavirta vuotokohdan pinta-alaa kohden prosessiuunin vedon funktiona.



**Kuva 16** Prosessiuuniin vuotoilman (engl. air leakage) massavirta vuotokohdan pinta-alaa kohden prosessiuunin vedon (engl. draft) funktiona (Ahamad & Vallavanatt 2012). Yksikkömuunnokset: 1 lb/hr = 0,454 kg/h, 1 ft<sup>2</sup> = 0,093 m<sup>2</sup>, 1 inchWC [4 °C] = 249,089 Pa.

Ahamad & Vallavanatt ovat laatineet vuotoilman massavirran määrittämiselle arviointikäyrän, joka on esitetty kuvassa 16. Vuotoilman massavirta on esitetty vuotoaukon pinta-alaa kohden uunin vedon funktiona. Vuotoilman määrä pystytään näin arvioimaan, kun tiedetään prosessiuunin veto ja vuotoaukon pinta-ala. Käyrää käytettäessä on syytä huomata, että vedon tulee olla määritettynä vuotokohdan korkeudella ja että ulkoilman lämpötilaksi on käyrän piirtämiseksi valittu 60 °F (15,556 °C). (Ahamad & Vallavanatt 2012) Ilmavuotojen arviointikäyrän piirtämiseen käytetyt kaavat on esitetty liitteessä 1.

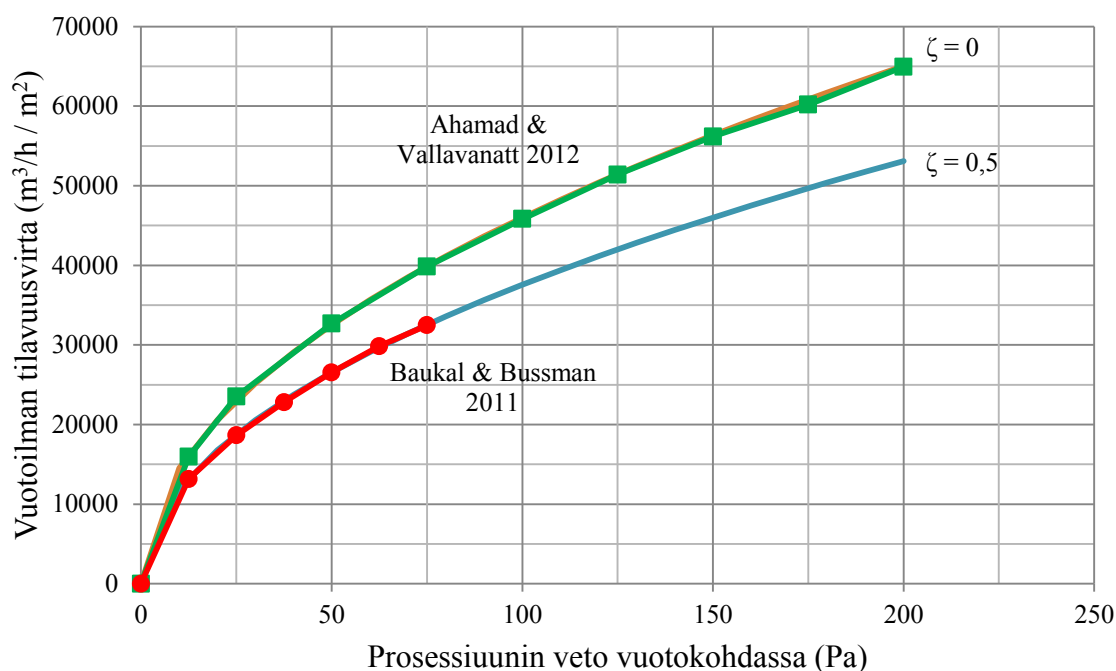
Myös Baukal & Bussman ovat määrittäneet ilmavuotojen arviointiin sopivan käyrän, joka on esitetty kuvassa 17. Kuvan 16 tapaan vuotoilman määrä on esitetty vuotoaukon pinta-alaa kohden uunin vedon funktiona. Tästä käyrästä vuotoilmavirta saadaan kuitenkin tilavuusvirtana. Koska tilavuusvirran yksikkönä on käytetty standarditilan yksiköitä, on ilman massavirtaa laskettaessa käytettävä standarditilassa määritettyä ilman tiheyttä. Baukal & Bussman eivät ole kuitenkaan määritelleet käytettävää standarditilaa, joten standarditilan valinnalla on vaikutusta ilman lämpötilaan sekä siten myös ilman tiheyteen.



**Kuva 17 Prosessiuunin virtaavan vuotoilman määrä (engl. air flow rate) vuotokohdan pinta-alaa kohden prosessiuunin vedon (engl. heater draft) funktiona (Baukal & Bussman 2011).**

**Yksikkömuunnokset:  $1 \text{ ft}^3/\text{hr} = 0,0283 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $1 \text{ square inch} = 0,000645 \text{ m}^2$ ,  $1 \text{ inchWC [4 °C]} = 249,089 \text{ Pa}$ .**

Kuvista 16 ja 17 voidaan huomata vuotoilmavirran olevan hyvin riippuvainen prosessiuunin vedosta. Mitä suurempi veto, sitä suurempi on myös vuotoilmavirtaus. Kuvissa esitetyn käyrän muoto on samankaltainen, mutta käyrien antamat ilmavirrat poikkeavat kuitenkin toisistaan. Käyriä voidaan verrata toisiinsa sekä luvussa 4.2.1 johdettuihin tuloksiin muuntamalla yksiköt sopivaan muotoon. Kuvan 16 käyrä pätee lämpötilassa  $60 \text{ °F}$  ( $15,556 \text{ °C}$ ), joten käytetään ilman tiheyden arvona  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  ( $15 \text{ °C}$ ), jota käytettiin myös luvussa 4.2.1. Yksikkömuunnosten jälkeen kaikki käyrät voidaan piirtää samaan kuvaajaan, joka on esitetty kuvassa 18. Kuvaajasta voidaan huomata, että Ahmadin & Vallavanattin esittämä käyrä yhtyy melko tarkasti luvussa 4.2.1 johdettuun käyrään, jossa kertavastus  $\zeta = 0$ . Vastaavasti Baukalin & Bussmanin esittämä yhtyy käyrään, jossa kertavastus  $\zeta = 0,5$ .



**Kuva 18** Prosessiuunin vuotoilman tilavuusvirta uunin vedon funktiona eri lähteiden perusteella. Kirjallisuudesta poimituille käyrille on tehty tarpeelliset yksikkömuunnokset.

Kirjallisuudesta esitettyjen käyrien eroavaisuuksien perusteella voidaan päätellä, että täysin yleispätevää vuotojen arviointia voi olla vaikea suorittaa. Erot arviointikäyrissä tulevat todennäköisesti vuotokohdan kertavastuskertoimen arvioinnissa. Tämän vuoksi myös arviointikäyrillä saadut tilavuusvirrat voivat poiketa toisistaan merkittävästi. Koska kirjallisuudessa esitetyt ilmavuotojen arviointikäyrät yhtyvät hyvin luvussa 4.2.1 johdettuihin käyriin, voidaan kaavaa (31) ja sen perusteella piirrettyjä käyriä pitää hyvänä keinona arvioida prosessiuunin ilmavuotoja. Oikean kertavastuskertoimen määrittäminen vuotoaukolle voi kuitenkin olla vaikeaa. Todennäköisesti kertavastuskertoimelle tulee kuitenkin asettaa nollasta poikkeava arvo, koska vuotoaukosta aiheutuu ilmavirralle painehäviöitä. Näin ollen Ahamad & Vallavanattin esittämää käyrää voidaan pitää vain ideaalisen ja häviöttömän vuototilanteen arviointikäyränä. Sopivan kertavastuskertoimen määrittämiseksi erityyppisille vuotoaukoille voidaan tehdä kokeellisia mittauksia, minkä seurauksena voidaan arvioida kukin aukkotyyppi omalla kertavastuskertoimellaan.

#### 4.2.4 Kokemusperäinen ilmavuotojen arviointikaava

Storm & Guffre esittävät kokemusperäisen kaavaan, jota voidaan käyttää kattiloiden ja ilmalämmittimien ilmavuotojen arvioimiseen. Kaavalla voidaan määrittää vuotoilman

osuus savukaasuista, kun tiedetään savukaasujen teoreettinen happipitoisuus palamisprosessin jälkeen ja savukaasujen todellinen happipitoisuus oletettujen vuotokohtien jälkeen. (Storm & Guffre 2010) Ilmavuotojen osuus savukaasuista voidaan näiden tietojen avulla laskea kaavasta:

$$Vuotoilma = \frac{O_{2,ulos} - O_{2,sisään}}{20,9 - O_{2,ulos}} \times 90 \quad (45)$$

Missä:

$Vuotoilma$	vuotoilman tilavuusosuus savukaasuista
$O_{2,ulos}$	laitteesta lähtevien savukaasujen happipitoisuus (til-%)
$O_{2,sisään}$	laitteeseen tulevien savukaasujen happipitoisuus (til-%)
20,9	ulkoilman happipitoisuus (til-%)
90	kokemusperäinen kerroin

Kaavassa on käytettävä hapen tilavuusosuuksia savukaasuista (Mallikarjuna et al. 2014). Mikäli käytetään massa- tai mooliosuuksia, kokemusperäinen kerroin ei enää välttämättä päde. Mallikarjuna et al. lupaavat menetelmän tarkkuudeksi  $\pm 1$  %, kun kaavaa käytetään ilmalämmittimien arviointiin (Mallikarjuna et al. 2014).

Storm & Guffre esittävät kuitenkin oikeiden happipitoisuuksien määrittämisen olevan hankalaa, mikä aiheuttaa virhettä kaavan käytössä. Savukaasujen happipitoisuus voi vaihdella ilmalämmittimen sisällä huomattavasti, minkä vuoksi laskennassa tulisi mitata myös happipitoisuuden lisäksi kinemaattinen paine sekä lämpötila ja käyttää näiden avulla painotettua keskiarvoa happipitoisuudelle. Mittauspisteiden tulisi sijaita myös lähellä seinämää ja arvioituja vuotokohtia. Usein mittauspisteitä on kuitenkin liian vähän ja keskiarvotettu happipitoisuus ei vastaa täysin oikeaa arvoa. Tällöin vuotoilman määrä tulee usein aliarvioiduksi. (Storm & Guffre 2010)

Kaavaa sovellettaessa prosessiuuneille ongelmana voi olla kaavalle sopivien happimittausten puuttuminen ja niiden luotettavuus. Hall et al. esittävät kaksi prosessiuunien happimittauksiin liittyvää ongelmaa, jotka rajoittavat kaavan käyttöä prosessiuuneille. Uuniin sisään tulevaa savukaasujen happipitoisuutta ei voida mitata, koska savukaasu-

jen muodostuminen tapahtuu palamisessa. Lisäksi jälkipolton esiintyminen aiheuttaa virhettä happimittauksissa palamisprosessin jälkeenkin. Ilman vuotaminen prosessiuuniin varsinaisen polttoalueen ulkopuolelta mahdollistaa palamattomaksi jääneen polttoaineen jälkipolton, minkä seurauksena savukaasujen happipitoisuus voi paikallisesti jopa pienentyä. Tällöin laskentakaavan (45) avulla saatu vuotomäärä on huomattavasti pienempi kuin todellinen vuotomäärä. (Hall et al. 2010)

Mikäli happimittausta ei ole saatavilla heti palamisprosessin jälkeen, prosessiuuniin sisään tulevana happipitoisuutena voidaan käyttää teoreettista happipitoisuutta, joka jää tulipesän palamisprosessista jäljelle. Kuten luvussa 3.3 todettiin, savukaasujen ylimääräisen mittaaminen tehdään yleensä säteilyosan yläosasta. Arvioitaessa säteilyosan ilmavuotoja tätä mittausta voidaan käyttää ulostulon happimittauksena. Jos kuitenkin halutaan arvioida myös konvektio-osan vuotoja, tulisi ulostulon happimittaus olla sijoitettu konvektio-osan jälkeen. Jälkipolton aiheuttama mittausvirhe voidaan minimoida palamisprosessin optimoinnilla. Prosessiuunin energiatehokkuuden kannalta on olennaista, että operoinnilla saavutetaan mahdollisimman täydellinen palaminen ja että palamatonta polttoainetta on savukaasuissa mahdollisimman vähän. Tällöin myös jälkipolton tulisi olla vähäistä ja sen aiheuttama virhe ilmavuotojen arvioinnissa vähäinen.



## 5 Ilmavuotojen määrittäminen käytännössä

### 5.1 Ilmavuotojen paikannus

Ilmavuotojen paikantamiseen potentiaalisista vuotokohdista voidaan käyttää monia eri menetelmiä. Viisi yleisesti käytössä olevaa menetelmää prosessiuunien tarkastamiseen ovat:

1. Uunin sisäpintojen tarkastelu ajon aikana
2. Uunin ulkopintojen kuvaaminen lämpökameralla ajon aikana
3. Prosessiuunin maalipinnan tarkastaminen
4. Savugeneraattorin käyttö uunin ulkopuolella
5. Savupommitesti uunin sisäpuolella

(Baukal & Bussman 2011)

Prosessiuunin seinämille sijoitetuista tarkastusluukuista voidaan katsoa tai kuvata kameralla uunin tulipesää ajon aikana. Tulipesän seinämltä voidaan havaita tummempia kohtia, jotka ovat ympäröivää aluetta kylmempiä. Nämä kohdat ovat hyvin potentiaalisia vuotokohtia, joista kylmä ulkoilma pääsee virtaamaan uunin sisäpuolelle. (Baukal & Bussman 2011)

Käynnin aikana uunin ulkopuoliseen visuaaliseen tarkasteluun käytetään pääosin lämpökameraa. Lämpökameralla voidaan havaita kohdat, joissa uunista poistuu lämpöä säteilynä muuta ympäristö enemmän. Uunin ulkokuoren tulisi olla viileä ja näyttää lämpökamerassa tummalta. Kuumat, lämpöhäviötä aiheuttavat alueet voidaan havaita selkeästi muita alueita kirkkaampana. Näistä kohdista myös vuotoilma voi päästä uunin sisälle.

Kolmas menetelmä uunin vuotokohtien havaitsemiseen on tarkastaa uunin maalipinta. Maalipinnan värimuutokset tai pois palaminen voivat olla seurausta tulipesän sisäpuolisen muurauksen vahingoittumisesta. Sisäpuolisen muuraukset puute on voinut edelleen aiheuttaa uunin teräskuoreen halkeamia, joista vuotoilma pääsee uunin sisälle. Maalipinnan tarkastaminen on epäsuora menetelmä eikä varsinaisesti kerro lämpöhäviöistä tai vuodoista, minkä vuoksi mahdolliset vuotokohdat suositellaan tarkastamaan uudelleen esimerkiksi savutesteillä. (Baukal & Bussman 2011)

Savua käyttämällä voidaan prosessiuunin todelliset vuotokohdat tutkia tarkasti. Käynnissä olevalla ja alipaineiselle prosessiuunille voidaan käyttää savugeneraattoria. Savugeneraattorilla tuotetaan savua uunin ulkopuolella tarkastaen liitoskohdat ja muut potentiaaliset vuotokohdat. Mikäli tarkastetussa kohdassa on vuoto, generaattorin avulla tuotettu savu virtaa selkeästi uunin sisäpuolelle. Tämän jälkeen todetut vuotokohdat voidaan paikata tai merkata tulevaa korjausta varten. (Baukal & Bussman 2011)

Savutesti voidaan tehdä myös täyttämällä prosessiuuni sisäpuolelta savulla savupommin tai vastaavan paljon savua tuottavan laitteen avulla. Testin aikana prosessiuunin tulee olla alasajettu. Suuri määrä savua tuodaan uunin palamisilmapuhaltimelle, jonka avulla savu virtaa prosessiuunin sisälle. Savukanavan savupelti ja polttimien ilmarekisterit suljetaan, jottei savu pääse niiden kautta ulos. Paineen noustessa uunin sisällä savu alkaa virrata vuotokohdista ulospäin. Koska puhallin on välttämätön paineen nostamiseksi, luonnonvetouuneissa tulee käyttää lisäpuhallinta. Testin jälkeen todetut vuotokohdat voidaan paikata kylmästä uunista. (Baukal & Bussman 2011)

## **5.2 Vuotokohdat ja syyt**

Prosessiuunien ilmavuodoille on mahdollista löytää useita eri syitä sekä uunin rakenteesta että käytöstä. Baukal & Bussman mukaan ilmavuotojen syyt voidaan tyypillisesti jakaa viiteen eri kategoriaan:

- Käytössä syntyneet vuodot
- Huonosti tiivistetyt aukot
- Eräperiaatteella toimivat prosessiuunit
- Polttimien ilmarekistereiden puutteellinen säätö
- Prosessiuunin huolimaton operointi

Tässä työssä ei käsitellä eräperiaatteella toimivia prosessiuuneja, koska niitä ei käytetä Nesteen öljynjalostusprosesseissa. Eräperiaatteella toimivia uuneja on sen sijaan käytössä muilla teollisuuden aloilla, kuten metallinjalostuksessa. (Baukal & Bussman 2011)

Prosessiuunien elinikä öljynjalostamoilla voi olla hyvinkin pitkä. Käytön aikana uunin teräsrakenteet altistuvat koville lämpötiloille ja kuluttaville sääolosuhteille. Teräsrakenteissa on lukuisia hitsaussaumoja ja pulttiliitoksia, jotka ovat voivat antaa periksi ja aiheuttaa ilmavuodon. Liitosten tiiveyden pettäminen voi johtua huonosta suunnittelusta

tai puutteellisesta kunnossapidosta. Lisäksi on syytä ottaa huomioon lämpölaajemisen aiheuttama kuormitus uunin ulkokuorelle. Huoltoseisokit, suunnittelemattomat alas- ja ylösajot, sekä ulkoilman lämpötilavaihtelut aiheuttavat lämpötilavaihteluita myös prosessiuunin ulkokuorelle. Lämpötilavaihteluiden vaikutuksesta uunin teräskuori ja sisäpuolinen vuoraus laajenevat ja supistuvat, mikä voi aiheuttaa halkeamia kuoreen. Halkeamat ovat tyypillisesti hyvin pieniä ja vaikeita havaita, mutta halkeamien lukumäärän kasvaessa suureksi niiden vaikutus voi olla huomattava. (Baukal & Bussman 2011)

Tyypillisesti prosessiuunin vaipassa on myös lukuisia, eri tarkoituksiin suunniteltuja aukkoja, joiden tiivistäminen on syytä tehdä huolella. Tällaisia ilmapuodoille alttiita aukkoja ovat muun muassa tulipesän ovet, tarkastusluukut, räjähdysluukut sekä erilaiset läpiviennit. Tarkastusluukut voivat usein olla sekä eristämättömiä että tiivistämättömiä, minkä vuoksi ne voivat vuotaa ja altistaa kuumuudelle. Kuumuudelle altistuminen vaikeuttaa yleensä luukun saamista täysin ilmatiiviiksi. Kuumana käyneen luukun tunnistaa rapistuneesta maalipinnasta. Läpivientejä on useissa eri osissa prosessiuunia. Pienempiä läpivientejä käytetään tyypillisesti mittausinstrumenttien sijoittamiseen uunin sisäpuolelle. Sen sijaan suuret läpiviennit ovat yleensä prosessiputkien sisään- ja ulostuloja tai konvektio-osan ulkopuolella olevia tuubikäyriä varten. Prosessiputkien ja uunin kuoren välisen aukon tiivistämistä vaikeuttavat putkien ja uunin ulkokuoren liikkuminen lämpötilavaihteluiden seurauksena. Joissakin uuneissa konvektio-osan tuubikäyrät on sijoitettu uunin ulkopuolelle. Tällöin tuubikäyrät on suojattu päätylaatikoilla, joiden tehtävänä on myös estää ilman virtaaminen uunin sisään. Päätylaatikon tiivisteet voivat kuitenkin kulua käyttökelvottomiksi uunin käytön aikana, etenkin jos päätylaatikon ovea on avattu usein. (Baukal & Bussman 2011)

Polttimien ilmarekistereiden säätö tulisi ottaa huomioon, mikäli uunia ajetaan vajaakapasiteetilla. Polttimien polttoainesuuttimien puhdistamiseksi tai prosessiuunin ylösajamiseksi osa polttimista voi olla sammutettuina. Sammutettujen polttimien ilmarekistereiden kautta virtaa kuitenkin alipaineiseen tulipesään ylimääräilmaa, mikäli ilmarekistereitä ei ole suljettu. Toisaalta ilmarekistereitä ei ole suunniteltu täysin ilmatiiviiksi vaan ilman vuotamista tulipesään voi tapahtuva, vaikka rekisteri olisikin suljettu. (Baukal & Bussman 2011) Harveyn mukaan polttimien ilmarekisterit suunnitellaan usein niin, että suljettuun ilmarekisteriin jää avointa virtauspinta-alaa 3 % koko ilmarekisterin virtauspinta-alasta. (Harvey 2015)

Prosessiuunin operoinnilla ei voida varsinaisesti poistaa ilmavuotoja, mutta voidaan vaikuttaa ilmavuotojen suuruuteen. Luvussa 3.1 todettiin, että prosessiuunin tulipesä pidetään jatkuvasti hiukan alipaineisena, mikä saa ilman virtaamaan sisäänpäin myös vuotokohdista. Uunin operoinnilla voidaan vaikuttaa alipaineen suuruuteen ja sitä kautta sisään virtaavan vuotoilman määrään. Mitä suurempi alipaine uunin tulipesässä on sitä enemmän ilmaa pyrkii vuotamaan sisään. Näin ollen savupellin ja ilmarekistereiden huolellinen operointi on tärkeää ilmavuotojen minimoimiseksi.

### **5.3 Ilmavuotojen mittaus**

Virtausmittaukseen on kehitetty hyvin paljon erilaisia instrumentteja, joilla mitataan yleensä joko virtauksen nopeutta tai tilavuusvirtaa (ASHRAE 2013). Suurin osa näistä ei kuitenkaan sellaisenaan sovellu prosessiuunin ilmavuotojen mittaamiseen. Ongelmana ilmavuotojen mittaamiselle ovat vuotoaukkojen epämääräisyys sekä prosessiuunin toiminta. Prosessiuunin sisälle virtaa vuotoilmaa vain uunin operoinnin aikana, minkä vuoksi virtausmittausta ei voida suorittaa alas ajetulle uunille. Korkea lämpötila ja uunin sisäiset kaasuvirtaukset kuitenkin estävät sisäpuolisen ilmavuotojen virtausmittauksen ajon aikana. Lisäksi vuotoaukkojen virtauspoikkipinta-ala sekä aukon pituus virtaussuunnassa voivat olla hyvin vaikeita määrittää. Uunin teräskuoressa voi olla muodoltaan selkeä aukko, mutta sisäpuolisessa vuorauksessa voi olla lukuisia halkeamia, joista ilma pääsee virtaamaan uuniin. Näin ollen vuotojen mittaamiseen ei voida suoraan soveltaa virtauskanaville suunniteltuja mittaustekniikoita vaan täytyy soveltaa muihin sovelluksiin kehitettyjä tekniikoita.

Mittalaitteistoa valittaessa tulee huomioida jalostamoalueen räjähdysvaaralliset tilat sekä sähkölaitteille asetetut turvallisuusvaatimukset. Tässä työssä käsiteltävistä uuneista BA-501 sekä BA-10401 kuuluvat vety-tilaluokkaan ja BA-75001 tilaluokkaan 2. Vetytilaluokassa on laitteita, jotka sisältävät yli 30 til-% vetyä. Tilaluokassa 2 ei normaali-käytön aikana odoteta esiintyvän räjähtävää kaasuseosta tai sen esiintyminen on hyvin harvinaista ja lyhytaikaista. Näiden tilaluokitusten perusteella mittalaitteiston sähköisten osien tulisi olla laiteluokituksestaan vähintään II2G EExd II CT3. (Neste Oil 2008, Neste Oil 2013, Neste Oil 2014)

### 5.3.1 Ilmavirran mittaaminen mittaussuppilolla

Mittaussuppiloa käytetään pääosin syöttö- ja poistoilmavirtojen mittaamiseen diffuusoreista ja säleiköistä LVI-systeemeissä (ASHRAE 2013). Kuvassa 19 on esitetty ilmavirran mittaukseen tarkoitettu mittaussuppilo. Mittaussuppilo koostuu metallisesta tai muovisesta kehikosta, jonka ympärille on kasattu kankainen huppu. Mittaussuppilon kapeammassa päässä on ilmavirran jako-osa ja mittausinstrumentti. (ASHRAE 2013)



Kuva 19 Ilmavirran mittaamiseen tarkoitettu mittaussuppilo (Swema 2015).

Ilmavirran mittaamiseksi mittaustorven leveämpi pääty asetetaan mitattavan aukon päälle. Huppu ohjaa aukkoon menevän tai aukosta tulevan ilmavirran kulkemaan mittaustorven jako-osalle. Jako-osassa ristikko jakaa ilmavirran moneen osaan mahdollistaen useiden pisteiden mittaamisen virtauksen nopeusjakaumasta ja näin ollen myös keskimääräisen virtausnopeuden määrittämisen. Jako-osan sisään- ja ulostulon välille on sijoitettu varsinainen mittausinstrumentti. Mittausantureina voidaan käyttää useita erilaisia laitteita, kuten siipipyöranemometriä, mikromanometriä tai kuumalankaanemometriä. Mittausinstrumentti tulkitsee anturin mittaaman tuloksen ja laskee tilavuusvirran käyttäjälle. (ASHRAE 2013)

Mittaussuppiloon muodostuu pieni virtausta vastustava vastapaine, joka johtuu suppilon aiheuttamasta painehäviöstä. Mittaustuloksena saatu tilavuusvirta on siis hieman pienempi kuin todellinen ilmavirta ilman mittausta. Yleensä todellisen ja mitatun ilmavirran erotus on kuitenkin merkityksetön suhteessa mittausinstrumentin tarkkuuteen, eikä sitä tarvitse huomioida käytännössä. Mittaussuppilon virhettä voidaan arvioida laite-

valmistajan tekemän käyrästön avulla, jossa laitteen on esitetty suppilon painehäviö eri tilavuusvirroilla. (ASHRAE 2013)

Mittaussuppiloa voidaan käyttää myös prosessiuunin ilmavuotojen määrittämiseen. Prosessiuunin rakenne vuotokohdissa voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia mittaussuppilon asettamiselle tiiviisti vuotokohdalle. Uunin putkisto ja instrumentointi voivat estää mittaamisen kokonaan. Vuotokohta voi myös sijaita prosessiuunin saumassa tai epätasaisella pinnalla, mikä vaikeuttaa mittaussuppilon tiivistämistä uunin pintaa vasten. Luvussa 5.2 on esitelty mahdollisia vuotokohtia, joista ainakin tarkastusluukkujen ilmavuotojen mittaaminen on mahdollista mittaussuppilon avulla. Ennen mittaamista on kuitenkin syytä varmistaa mittauslaitteen kestävyys korkeissa lämpötiloissa, sillä prosessiuunin pinnat saattavat olla selvästi ulkoilmaa kuumempia.

## Soveltava osa

### 6 Ilmavuotojen määrittäminen simuloinnin avulla

#### 6.1 Uunisimulointiohjelma FRNC-5PC

Prosessiuunien toiminnan simulointiin voidaan käyttää PFR Engineering Systemsin kehittämää FRNC-5PC -simulointiohjelmaa. Ohjelma on kehitetty erityisesti kemian- ja energiateollisuuden prosessiuunien suunnitteluun ja analysointiin. Simulointiohjelma perustuu tyypillisen prosessisimulaattorin lisäksi myös käytännössä testattuihin lämmönsiirron ja painehäviöiden laskentamenetelmiin. Simuloinnissa tarvitaan lähtötietoina prosessiuunin geometria, prosessiaineen tila ja ominaisuudet sekä polttoaineen ominaisuudet. Tarvittavat prosessiaineen ominaisuudet voidaan määrittää myös ohjelmassa, mikäli tiedetään prosessiaineen eri komponenttien osuus massaprosentteina. Puhtaille hiilivetyseoksille ei kuitenkaan tarvita tarkkaa komponenttijakaumaa vaan lähtötiedoiksi riittää seoksen tislaukikäyrä ja tiheys. Annettujen Lähtötietojen perusteella ohjelma laskee prosessiuunille toiminta-arvot. Ohjelman avulla voidaan arvioida muun muassa:

- Prosessi- ja kapasiteettimuutosten vaikutusta uunin toimintaan
- Prosessiuunin hyötysuhdetta ja lämpötehoa
- Tuubien likaantumista ja pintalämpötiloja
- Painehäviöitä
- Palamisilman määrän ja lämpötilan vaikutusta uunin toimintaan

Prosessiuunin lämmönsiirtoon käytettävien osien lisäksi simulointiohjelman tarkasteluun voidaan lisätä myös erilaisia kanavia, savupiippu sekä siirtolinjat ennen ja jälkeen prosessiuunin. (PFR Engineering Systems 2015)

#### 6.2 Simulointitilanne ja ilmavuotojen määrittäminen

Uunikohtaisten ilmavuotojen määrittämiseksi prosessiuunien toimintaa simuloidaan uuniohjelmalla käyttäen lähtötietoina mittausinstrumenteilta saatuja prosessiarvoja. Prosessiarvot voidaan lukea TOP-järjestelmästä, johon on koottu kaikki saatavilla oleva sähköinen mittausdata. Jotta simulointi saataisiin vastaamaan mahdollisimman hyvin nykyistä ajotilannetta, sekä prosessiaineista että polttokaasuista otettiin näytteet, joiden

perusteella voitiin määrittää seoksen komponenttien osuudet massaprosentteina sekä simuloinnissa tarvittavat aineominaisuudet. Näytteenottohetken ympäriltä rajattiin tunnin tarkastelujakso, jonka ajalta haettiin prosessiarvojen 10 minuutin keskiarvot TOP-järjestelmästä. Prosessiarvoista tarkistettiin myös, että prosessi on pysynyt likimain vakiona koko tarkastelujakson ajan.

Koska prosessiaineen tiheys poikkeaa prosessiaineen virtausmittauksen suunnitteluvasta, täytyy virtausmittauksen ilmoittama massavirta korjata mittaushetken tiheyteen. Virtausmittauksen korjaukset tehtiin kaavalla:

$$\dot{m}_K = \dot{m}_M \sqrt{\frac{\rho_M}{\rho_D}} \quad (46)$$

Missä:

$\dot{m}_K$	tiheyskorjattu ilman massavirta (kg/s)
$\dot{m}_M$	mitattu ilman massavirta (kg/s)
$\rho_D$	instrumentin suunnittelutiheys (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_M$	mitattu tiheys (kg/m <sup>3</sup> )

(Peramanu & Wah 2011)

Prosessiuunin geometria, koeajotilanteen prosessiarvot sekä prosessiaineen ja polttokaasun koostumus ja ominaisuudet syötettiin uunisimulointiin. Annettujen lähtötietojen perusteella voitiin uunille laskea tase, jonka tulisi vastata tarkasteltua ajotilannetta. Prosessiuunien pilot-polttimissa käytetään polttoaineena maakaasua. Pilot-polttimien polttoteho on kuitenkin hyvin pieni verrattuna uunin kokonaispolttotehoon, minkä vuoksi niitä ei huomioitu uunisimuloinnissa.

Ilmavuotojen määrittämisen kannalta tärkeintä on selvittää palamiseen käytettävä ilmamäärä sekä simulointiohjelmassa että käytännön prosessissa. Pakkovetouuneissa todellinen ilmamäärä saadaan mitattua palamisilmapuhaltimelle menevästä ilmamäärästä. Simulointiohjelma laskee prosessiuunin virtaavan teoreettisen ilmamäärän. Teoreettiseen ilmamäärään vaikuttaa ohjelmaan syötetty savukaasujen jäännöshappipitoisuus. Jäännöshappipitoisuudeksi syötettiin tarkasteltavien prosessiuunien happianalysaattoreista saatu arvo. Happianalysaattorit mittaavat märkää savukaasua ja antavat ylimäärähapen määrän tilavuusprosentteina. Simulointiohjelmaan on kuitenkin syötettävä lähtö-



tiedot mooliprosentteina. Oletettaessa savukaasu ideaalikaasuksi voidaan ideaalikaasun tilanyhtälön nojalla todeta, että kaasuseoksen prosentuaalinen koostumus on sama sekä tilavuus- että mooliprosentteja käytettäessä. Näin ollen simulointiohjelmaan voidaan suoraan syöttää määstä savukaasusta mitattu ylimäärähapen osuus.

Kun simulointiohjelman ja happianalysoijan antamat ylimäärähapen osuudet määssä savukaasussa on saatu vastaamaan toisiaan, simuloinnista saadun ilmamäärän ja todellisen palamisilmakanavasta mitatun ilmamäärän tulisi vastata toisiaan. Mikäli ilmamäärässä on eroja ja simulointitase vastaa muilta osin hyvin käytännön ajotilannetta, voi prosessiuunissa olla ilmavuotoja. Ilmavuotojen määrä voidaan arvioida vertaamalla simuloidussa saatua ilmavirtaa todelliseen, uunilta mitattuun ilmavirtaa. Mikäli simuloinnissa saatu ilmavirtaus on suurempi kuin mitattu ilmavirta, voidaan olettaa että prosessiuuniin vuotaa erotuksen verran ilmaa virtausmittauksen ohii.

Luonnonvetouuneissa uuniin syötettyä ilmamäärää ei pystytä mittaamaan, minkä vuoksi yllä esitettyä tarkastelua ei voida suorittaa prosessiuunille BA-10401. Prosessiuunille BA-10401 rakennettiin kuitenkin vastaavanlainen simulointimalli kuin muillekin uuneille, jotta teoreettista ilmamäärää voitaisiin käyttää vertailukohtana kokeellisissa mittauksissa. Uunilta BA-10401 ei otettu uusia näytteitä prosessiaineesta eikä polttokaasusta vaan käytettiin aikaisemmin määritettyjä koostumuksia ja aineominaisuuksia.

### **6.3 Tarkasteltavat prosessiuunit ja simulointitulokset**

Tässä työssä tarkasteltaviksi prosessiuuneiksi on valittu kolme rakenteeltaan ja prosessiolosuhteiltaan toisistaan poikkeavaa prosessiuunia. Kaikki tarkasteltavat uunit sijaitsevat Nesteen Porvoon jalostamon tuotantolinjoilla. Prosessiuunien tärkeimmät eroavaisuudet on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2 Tarkasteltavien prosessiuunien tärkeimmät eroavaisuudet.**

Laitetunnus	BA-501	BA-10401	BA-75001
Uunityyppi	Laatikkouuni jaetulla säteilyosalla	Sylinteriuuni	Laatikkouuni
Valmistusvuosi	1964	1974	2005
Prosessiaineen syöttö	Tislauskolonni	Reaktori	Tislauskolonni
Säteilyosassa virtaava aine	Prosessiaine	Prosessiaine	Prosessiaine
Konvektio-osassa virtaava aine	Prosessiaine	Prosessiaine	Höyry
Läpikäyntien lukumäärä	4	4	Höyry: 2–8 Prosessiaine: 2
Absorboitunut lämpöteho	32,87 MW	11,03 MW	29,73MW
Vetotapa	Pakkoveto (tasapainotettu veto)	Luonnonveto	Pakkoveto (imuveto)
Ilman esilämmitys	Savukaasuilla	-	Höyryllä

### 6.3.1 Kaasuöljyn jakotislausyksikön prosessiuuni BA-501

Kaasuöljyn jakotislausyksikön (KTY) prosessiuunilla BA-501 kuumennetaan jakotislauskolonnin DA-511 syöttöä. Prosessiuunin läpi menevät virrat, apulaitteet sekä instrumentointi on esitetty kuvassa 20. Uuni on tyypiltään laatikkomallinen uuni, jossa tulipesä on jaettu kahteen erilliseen osaan. Prosessiaine tulee uunille konvektio-osan yläosasta ja virtaa uunin läpi neljässä läpikäynnissä poistuen säteilyosan yläosasta. Normaalisissa ajotilanteissa simulointiohjelmasta saatu uunin polttoteho on 37,75 MW ja prosessiaineeseen absorboitunut lämpöteho 32,87 MW. Prosessiuunin hyötysuhteeksi saadaan 87,4 %, jossa on huomioitu palamisilman esilämmitys savukaasuilla.

Ilman ja savukaasun kierrätys uunin läpi tehdään pakkovedon avulla. Palamisilmapuhaltimella GB-502 nostetaan palamisilman paine ennen ilman esilämmitintä PA-501. Esilämmittimessä palamisilman lämpötila nostetaan noin 200 °C:een savukaasusta saatavan lämmön avulla. Esilämmitetty palamisilman johdetaan uunin tulipesän itä- ja länsi-

päädyn seinämille sijoitetuille 24 polttimelle. Prosessiuunista lähtevät savukaasut johdetaan ilman esilämmittimelle ja edelleen savukaasupuhaltimen GB-503 kautta savupiippuun CA-6101.

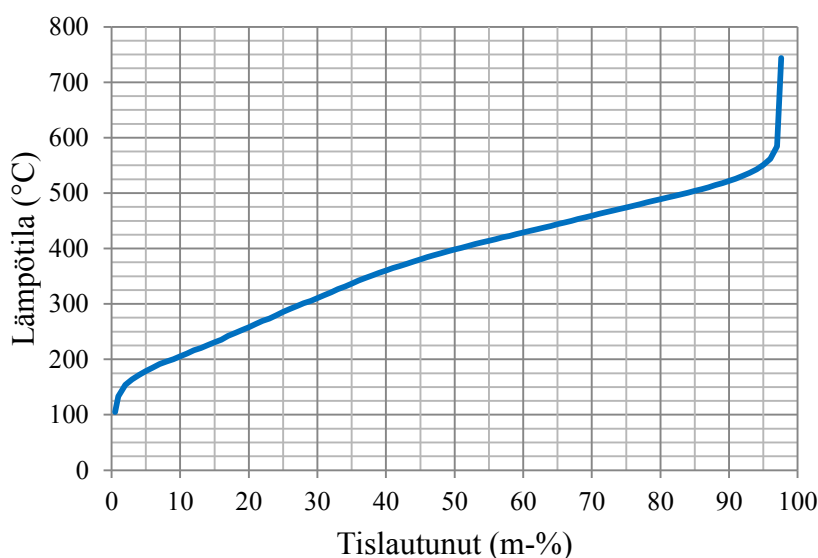
Prosessiuunin BA-501 oleelliset instrumentit ilma- ja savukaasukierron säädön kannalta ovat happianalysaattori ACA508 sekä vetomittaus PCA520. Happianalysaattori mittaa savukaasujen happipitoisuutta, joka on TOP-järjestelmästä saatujen tietojen perusteella yleensä noin 3–5 til-%. Analysaattorin antaman happipitoisuuden ja palamisilman virtausmittauksen FCZ559 perusteella säädetään palamisilmapuhallinta ja siten myös uuniin tulevan palamisilman määrää. Prosessiuunin vedon säätö puolestaan tehdään savukaasupuhaltimella, jonka toimintaa ohjataan vetomittauksen, palamisilman virtausmittauksen sekä savukaasujen painemittauksen PC521 perusteella. Prosessiuunin veto on TOP-järjestelmästä saatujen tietojen perusteella yleensä noin 28–30 Pa alipainetta, joka on melko lähellä luvussa 3.1 esitettyä tavoitearvoa (25 Pa alipainetta).

KTY:n prosessiuunin BA-501 simuloinnin lähtötiedot on kerätty TOP-järjestelmästä 10 minuutin keskiarvona ajalta 18.3.2015 kello 8.30–8.40. Samaan aikaa otettiin myös näytteet uunille syötettävästä prosessiaineesta sekä polttokaasusta, jotka analysoitiin laboratoriossa. Saadut prosessin lähtötiedot sekä näyteanalyysit syötettiin simulointimalliin, minkä jälkeen prosessiuunille voitiin laskea energia- ja massataseet.

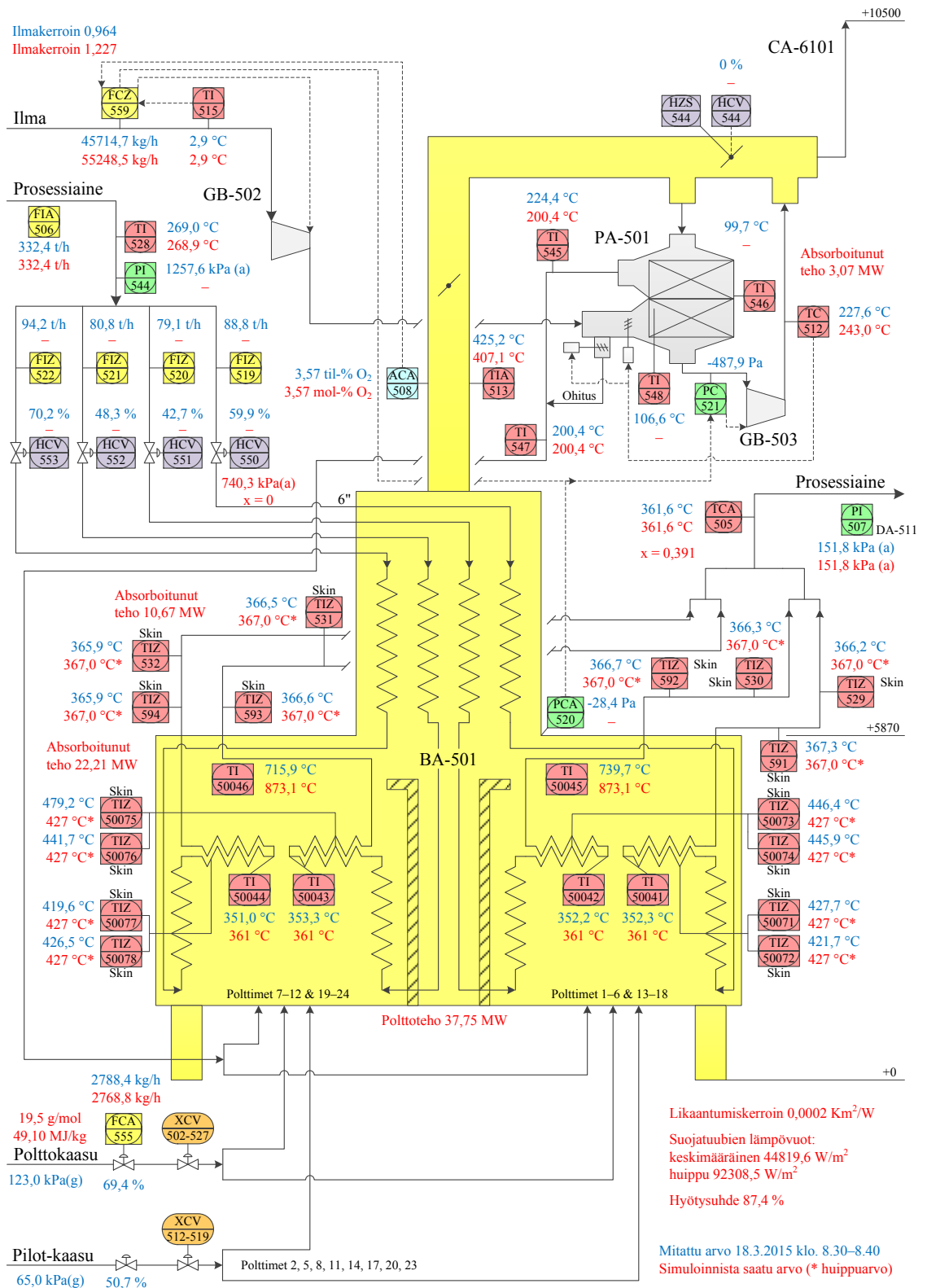
Prosessiaineesta otetusta näytteestä analysoitiin tislauk käyrä, koostumus ja tiheys. Prosessiaineen tislauk käyrä sekä tiheys on esitetty taulukossa 3. Laboratoriossa tislauk käyrä on määritetty menetelmällä ASTM D7169. Uunisimulointiohjelmassa tätä menetelmää ei ole saatavilla, joten tislauk käyrän menetelmäksi on ohjelmassa syötetty ASTM D2887, joka on laboratoriohenkilökunnan mukaan lähimpänä laboratoriossa käytettyä menetelmää. Prosessiaineen tiheys on määritetty lämpötilassa 15 °C, ja edelleen muunnettu simulointiohjelman vaatimaan lämpötilaan 15,6 °C (60 °F). Tämän jälkeen on määritetty ominaispaino käyttämällä veden tiheytenä API-standardin (American Petroleum Institute) arvoa 999,016 kg/m<sup>3</sup> (60 °F). Ominaispainolla tarkoitetaan prosessiaineen tiheyden suhdetta veden tiheyteen. Prosessiaineen tarkempi tislauk käyrä sekä koostumusanalyysi ovat saatavissa OiLi-laboratoriojärjestelmästä.

**Taulukko 3 Kaasuöljyn jakotislausyksikön prosessi-uunin BA-501 prosessiaineen tislaukikäyrä, tiheys ja ominaispaine sekä polttokaasun koostumus 18.3.2015 otettujen näytteiden perusteella.**

Prosessiaineen tislaukikäyrä (ASTM D7169)		Polttokaasun koostumus 18.3.2015		
Tislautunut (m-%)	Lämpötila (°C)	Vety	52,20	mol-%
0,5	104,6	Typpi	2,20	mol-%
5	178,6	Hiilidioksidi	0,01	mol-%
10	205,4	Metaani	10,10	mol-%
20	258,0	Etaani	11,30	mol-%
30	310,8	Eteeni	0,10	mol-%
40	360,2	Propaani	12,30	mol-%
50	398,4	Propeeni	0,10	mol-%
60	429,0	I-Butaani	4,60	mol-%
70	459,0	N-Butaani	4,00	mol-%
80	488,8	I-Pentaani	1,40	mol-%
90	522,0	N-Pentaani	0,80	mol-%
97,6	743,8	C4 Olefiinit	0,20	mol-%
Prosessiaineen ominaisuudet		C6+RASK	0,80	mol-%
Tiheys 15 °C	884,7 kg/m <sup>3</sup>	Molekyylipaino	19,53	g/mol
Ominaispaine 15,6 °C	0,8852	Lämpöarvo	49,00	MJ/kg



Taulukossa 3 on esitetty myös polttokaasunäytteen perusteella määritetty koostumus, molekyylipaino ja lämpöarvo. Määritettyä koostumusta käytettiin simulointiohjelmassa, mutta ohjelma laskee itse edelleen molekyylipainon ja lämpöarvon polttokaasulle. Simulointiohjelman molekyylipaino ja lämpöarvo on esitetty simulointitulosten yhteydessä kuvassa 20.



Kuva 20 Kaasuöljyn jakotislausyksikön prosessiunin BA-501 virtauskaavio, jossa on esitetty uunin läpi menevät virrat sekä tärkeimmät instrumentit ja apulaitteet. Mittauksista saadut prosessi-arvot on merkitty sinisellä ja simuloinnista saadut prosessi-arvot punaisella.

Prosessiuunin BA-501 tärkeimmät simulointitulokset sekä TOP-järjestelmästä kerätty mittaustiedot on esitetty kuvassa 20. Simuloinnista saadut prosessiarvot on esitetty punaisella ja mittaustulokset sinisellä. Prosessiaineen tila simulointimallissa vastaa melko hyvin mittaustuloksia, joskin prosessiaineen sisääntulopaine on simuloinnissa asetettu uunin sisääntuloon, kun taas painemittaus PI544 on sijoitettu uunin syöttölinjaan. Prosessiaineen ulostulo on mallissa asetettu kolonnin syöttöpohjalle, ja simuloinnin ulostulon lämpötila ja paine vastaavatkin kolonnin syötöstä mitattuja arvoja. Uunin sisääntulossa prosessiaineen lämpötilassa on 0,083 °C ero, joka on kuitenkin mitätön suhteessa uunin kokonaislämpötehoon, ja sen vaikutus uunin taseeseen voidaan jättää huomioimatta. Uunin syötön ollessa 332,4 t/h prosessiaineen sisääntulolämpötilan muutokset vaikuttavat tarvittavaan lämpötehoon noin 265 kW/°C.

Prosessiuunin BA-501 säteilyosan lämpötilamittaukset poikkeavat simuloinnista saaduista arvoista selvästi. Eteläisessä tulipesässä lämpötilamittauksen TI50046 ja simulointiarvon ero on 157,2 °C, joka vastaa noin 22,0 % mitatusta lämpötilasta. Vastaavasti pohjoisen tulipesän lämpötilamittauksen TI50045 ja simulointiarvon ero on 133,4 °C ja 18,0 % mitatusta lämpötilasta. Lämpötilamittaukset on sijoitettu prosessiuunin länsipäätyyn, noin metrin verran säteilyosan katon tuubien alapuolelle. Simuloinnissa lämpötilan tarkastelupiste on säteilyosan katossa olevan tuubiryhmän sisääntulossa, joten korkeus on likimain sama sekä simuloinnissa että lämpötilamittauksissa. Molempien lämpötilamittausten uunin sisään jäävän osan pituus on noin 470 mm, ja uunin säteilyosan pituus mittaustulosten suunnassa on 13110 mm. Täten lämpötilamittaukset jäävät hyvin lähelle seinää ja savukaasuvirtauksen katvealueelle. Simulointiohjelmasta saatu lämpötila on savukaasujen lämpötila, kun taas lämpötilamittaus on riippuvainen tulipesän lämmönsiirrosta. Näin ollen lämmönsiirron vastukset rajoittavat mittaustulosten lämpötilan nousua, eivät mittaustulot mittaa täydellisesti savukaasujen lämpötilaa.

Simulointiohjelman laskemat tuubien pintalämpötilat vastaavat osittain mitattuja arvoja. Välittömästi prosessiuunin ulkopuolella sijaitsevien pintalämpötilamittausten ja simulointiarvojen välillä on eroa vain 0,3–1,1 °C mittauksesta riippuen. Sen sijaan säteilyosan katossa olevien tuubien pintalämpötiloissa on huomattavasti enemmän eroa. Mittausinstrumentit on säteilyosassa sijoitettu katon alemman tuubirivin kunkin läpikäynnin viimeiseen tuubiin, joka on virtaussuunnassa tämän tuubirivin yhdeksäs tuubi. Näis-

tä tuubeista prosessiaine kuitenkin virtaa vielä ylempään säteilyosan katon ylempään tuubiriviin ja edelleen ulos uunista. Mittausinstrumentteja on kussakin tuubissa kaksi ja ne on sijoitettu likimain tuubipituuden kolmasosan päähän uunin seinämistä ja toisistaan. Simulointiohjelmasta tarkasteltiin vastaavan tuubiryhmän yhdeksättä tuubia, jolle saadaan ohjelmasta vain koko tuubin pintalämpötilojen huippuarvo. Säteilyosan reunimmaisissa läpikäynneissä simulointiarvo ja mitattu arvo vastaavat toisiaan melko hyvin, ja eroa on 0,5–7,4 °C, joka vastaa 0,1–1,8 % mitatuista lämpötiloista. Sen sijaan säteilyosan keskimmäisten läpikäyntien lämpötilamittausten TIZ50073–TIZ50076 ja simuloitujen lämpötilojen erot ovat huomattavasti suurempia, 14,7–52,2 °C. Pintalämpötilamittauksen TIZ50075 kohdalla ero on selkeästi suurempi kuin muissa vastaavissa mittauksissa, minkä vuoksi mittausinstrumentin kalibrointi olisi syytä tarkastaa ja arvioida mittauksen luotettavuus. Jos tämä mittaus jätetään tarkastelun ulkopuolelle, keskimmäisten läpikäyntien mittausten ja simulointimallin pintalämpötilojen välinen ero on korkeimmillaan 4,3 % mitatusta lämpötilasta.

Keskimmäisten läpikäyntien lämpötilamittausten ja simuloinnista saatujen arvojen suurempaa eroa selittävät osittain läpikäyntien virtausmäärät. Simulointiohjelmassa prosessiaine jakautuu tasaisesti kaikkiin läpikäynteihin ja näin ollen pintalämpötila on kaikissa läpikäynneissä sama. Todellisessa tilanteessa keskimmäisten läpikäyntien virtausmäärä on kuitenkin pienempi virtausmittausten FIZ520 ja FIZ521 perusteella. Pienemmän virtausmäärän vuoksi prosessiaine jäädyttää tuubia vähemmän ja pintalämpötila kohoaa korkeammaksi kuin muissa läpikäynneissä.

Polttokaasun osalta simulointiohjelman määrittämät molekyylipaino ja lämpöarvo vastaavat hyvin laboratoriossa määritettyjä arvoja. Myös polttokaasun virtausmäärä vastaa melko hyvin mitattua arvoa, sillä eroa on noin 19,6 kg/h, joka vastaa noin 0,7 % osuutta mitatusta polttokaasuvirrasta. Polttokaasun virtausmittaus FCA555 tehdään coriolismassavirtausmittarilla, joka on mitoitettu molekyylipainolle 23 g/mol. Mitoituksessa käytetty molekyylipaino on merkittävästi suurempi kuin prosessiuunilta otetun polttokaasunäytteen molekyylipaino 19,5 g/mol. Massavirtausmittari kuitenkin huomioi molekyylipainon muutokset, joten mittaustulosta ei tarvitse korjata, ja mitattua arvoa voidaan verrata simuloinnista saatuun arvoon.

Ilmavuotojen määrittämisen kannalta merkittävin vertailukohde simulointimallin ja mitauksien välillä on uuniin syötettävä palamisilman määrä. Uunille BA-501 simuloinnista saatu ilmamäärä ja mitattu ilmamäärä poikkeavat hyvin paljon toisistaan. Mitattu ilmamäärä on 9533,8 kg/h pienempi kuin simuloinnista saatu savukaasujen ylimäärähappipitoisuuden ollessa molemmissa tapauksissa 3,57 til-%. Mitatun ja simuloidun ilmamäärän ero vastaa noin 17,3 % osuutta simuloinnin ilmavirrasta. Koska simuloinnin poltto kaasun virtausmäärä, lämpöarvo ja molekyylipaino vastasivat melko hyvin mitattuja arvoja, voidaan simuloinnista saatua ilmavirtaa pitää luotettavana arviona vuotamattoman uunin ilmavirrasta tarkastelluissa prosessiolosuhteissa. Prosessiuuni siis tarvitsee simulointimallin mukaan 55248,5 kg/h ilmaa mitatulla ylimäärähappipitoisuudella, ja tästä ilmamäärästä 17,3 % on vuodettava uuniin virtausmittauksen FCZ559 ohi. Täten voidaan olettaa, että prosessiuuniin vuotaa hyvin paljon ilmaa vääristä kohdista ja uunin palamisprosessi ei välttämättä ole täysin optimaalinen.

Palamisilman virtausmittaus FCZ559 on venturi-tyyppinen mittaus, mikä sulkee pois ilmapaineen vaihteluiden aiheuttamat mittausvirheet. Mitattu ilmamäärä tulisi kuitenkin korjata mitoituslämpötilasta tarkasteluhetken todelliseen ilman lämpötilaan (2,9 °C). Virtausmittauksen FCZ559 mitoituslämpötilasta ei kuitenkaan löydetty tietoa, minkä vuoksi mitattua ilmamäärää ei voitu korjata. Ero simuloinnin ja mitatun ilmamäärän on kuitenkin niin suuri, ettei se selity pelkästään virtausmittauksen lämpötilaerolla.

Ilman virtausmittaus on sijoitettu ennen ilman esilämmitintä ja palamisilmapuhallinta. Täten ilmavuotoja voi olla palamisilmakanavassa sekä ilman esilämmittimessä. Vaikka näissäkin tapauksissa vuotoilman määrää on mahdoton kontrolloida, vuotoilma saadaan kuitenkin syötettyä prosessiuuniin polttimien läpi. Näin ollen haittavaikutukset eivät ole niin suuria kuin prosessiuunin säteilyosan tai konvektio-osan vuotopaikoissa. Toisaalta pakkovetouunissa palamisilman tulisi olla ylipaineessa sekä palamisilmakanavassa että ilman esilämmittimessä. Näin ollen palamisilman tulisi vuotaa ulospäin, eivätkä vuodot selitä mitatun ilmavirran ja simuloidun ilmavirran erotusta.

Esilämmittimestä tuleva palamisilma jäähtyy mittausten TI545 ja TI547 välillä melko paljon (24,0 °C). Mittausten mukaan esilämmittimen ohitus on ollut mittaushetkellä kiinni. Koska ilma kuitenkin jäähtyy reilusti, kylmää ilmaa vuotaa esilämmittimen ohi tai lämpötilamittauksissa on mittausvirhettä. Näin suuri ilman jäähtyminen tukee kui-



tenkin kylmän ilman vuotamista palamisilmakanavaan. Ilmakanavan tiiveys sekä mittauksen luotettavuus ja kalibrointi olisikin syytä tarkastaa.

Uunisimuloinnin perusteella 17,3 % (9533,8 kg/h) uunin palamisilmavirrasta vuotaa uuniin virtausmittauksen ohi. Näin suuri vuotoilmamäärä on merkittävä uunin operoinnin sekä uunin energiatehokkuuden kannalta. Simulointitulosten perusteella prosessiuunissa BA-501 pitäisi siis olla lukuisia vuotokohtia. Näiden kokonaisvuotopinta-alan suurusluokkaa pystytään arvioimaan kaavan (31) avulla, mikäli voidaan määrittää vuotoaukoille kertavastuskerroin ja arvioimaan veto vuotoaukon yli. Kertavastuskertoimen arvioimista on käsitelty tarkemmin luvussa 7.5.

### **6.3.2 Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön 3 prosessiuuni BA-10401**

Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön 3 (KARP3) prosessiuunia BA-10401 käytetään reaktorin DC-10403 syötön kuumennukseen. Kuvassa 21 on esitetty prosessiuunin läpi menevät virrat, tärkeimmät apulaitteet sekä instrumentointi. Prosessiaine tulee neljässä läpikäynnissä sylinterin muotoiselle prosessiuunille. Prosessiaine virtaa ensin konvektio-osan läpi ja edelleen säteilyosan läpi. Kuumennettu prosessiaine poistuu säteilyosan yläosasta. Normaalissa ajotilanteessa simulointiohjelmasta saatu uunin polttoteho on 14,23 MW ja prosessiaineeseen absorboitunut lämpöteho 11,03 MW. Prosessiuunille saatu hyötysuhde on tällöin 77,6 %.

Ilma- ja savukaasukierto tapahtuu uunissa luonnonvedon avulla. Palamisilma virtaa uunin vedon seurauksena uunin alapuolella olevaan ilmakanavaan. Ilmakanavassa ilma jakautuu neljälle polttimelle. Prosessiuuni on suunniteltu alun perin kahdeksalle polttimelle, mutta näistä neljä on poistettu, mikä vaikuttaa sekä saatavaan lämpötehoon, että hyötysuhteeseen. Prosessiuunista poistuvat savukaasut johdetaan TL3:n yhteiseen savupiippuun CA-10903, johon yhtyy myös muiden uunien savukaasukanavia.

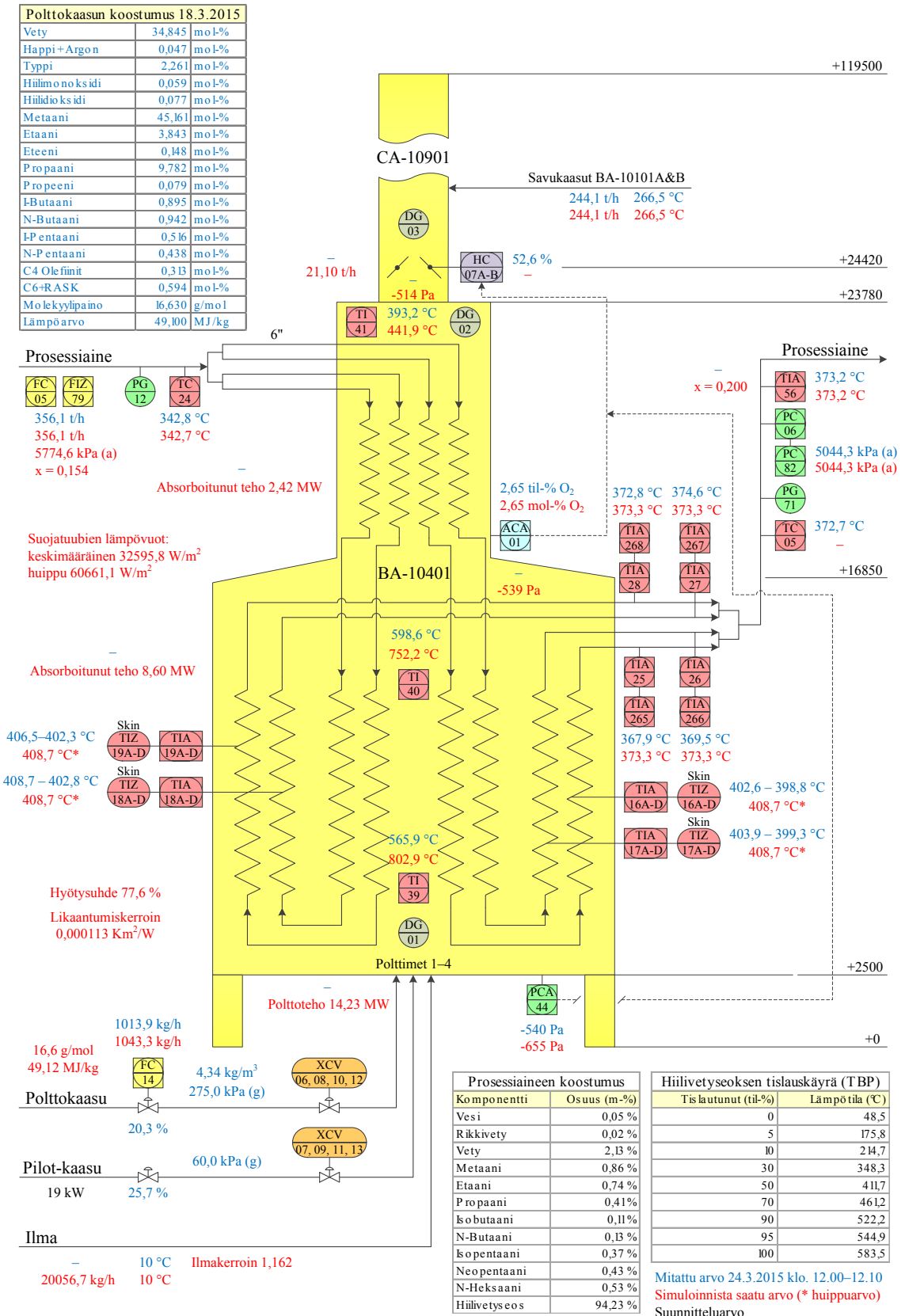
Prosessiuunin ilma- ja savukaasukierron säätö tapahtuu käytännössä vain savupeltien PC10444 avulla. Savupellin säädössä tärkeimmät instrumentit ovat happianalysaattori ACA10401 säteilyosan yläosassa sekä vetomittaus PCA10444 säteilyosan pohjassa. TOP-järjestelmästä kerättyjen tietojen perusteella savukaasujen jäännöshappi on yleensä 2–3 til-% määstä savukaasusta ja säteilyosan pohjan veto 300–600 Pa alipainetta. Myös

polttimien ilmarekistereiden säädöillä voidaan vaikuttaa ilma- ja savukaasukiertoon, mutta normaalissa ajotilanteessa ilmarekistereiden avauma pidetään vakiona.

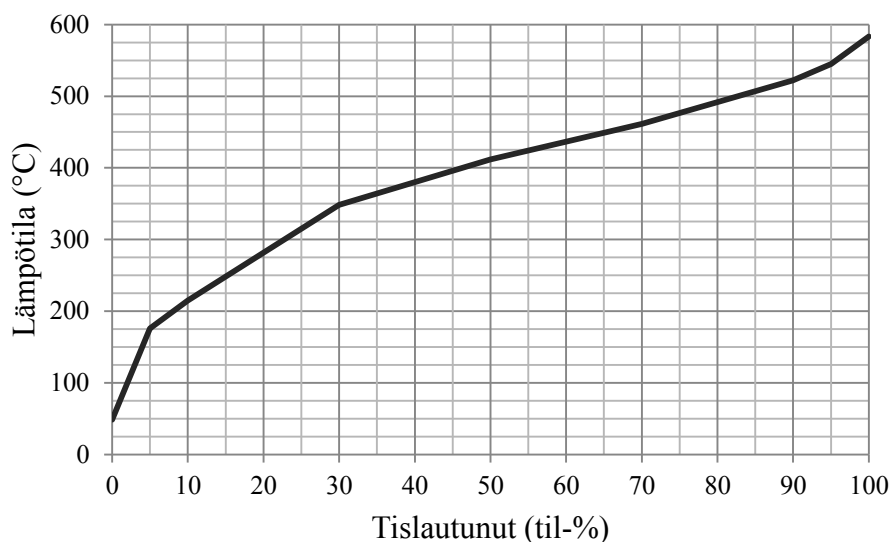
KARP3:n prosessiuunin simuloinnin lähtötiedot haettiin 10 minuutin keskiarvona TOP-järjestelmästä ajalta 24.3.2015 kello 12.00 – 12.10, jolloin suoritettiin myös kokeellisia mittauksia, joita on käsitelty tarkemmin luvussa 7. Haetut lähtötiedot päivitettiin ole-massa olevaan BA-10401:n simulointimalliin. Simulointimalliin jouduttiin kuitenkin rakentamaan syöttölinja uunilta reaktorille, sillä prosessiaineen ulostulon paine- ja läm-pötilamittaukset on sijoitettu reaktorin sisääntulon lähelle. Täten reaktorin syöttölinjan aiheuttamat painehäviöt saatiin huomioitua myös simulointimallissa.

Simuloinnissa käytetty polttokaasun koostumus on määritetty raakaöljyn tislausyksikön 3 (RT3) yhteisestä polttokaasusta 18.3.2015 kello 8.00 otetusta näytteestä. Kuvan 21 taulukossa on esitetty simuloinnissa käytetyn polttokaasun koostumus sekä laboratori-ossa määritetty molekyylipaino ja lämpöarvo. Vastaavasti simulointiohjelman määrit-tämät molekyylipaino ja lämpöarvo on esitetty punaisella polttokaasun virtausmittauk-sen FC10414 vieressä. Yksilöityä polttokaasunäytettä ei prosessiuunille BA-10401 voi-tu ottaa näytteenottopaikan puuttumisen vuoksi. Näytteenottopaikan jälkeen uunin polt-tokaasulinjassa ei kuitenkaan ole yhtymäkohtia muihin polttokaasun syöttölinjoihin, minkä vuoksi koostumuksen voidaan olettaa pysyvän samana.

Prosessiuunissa kiertävästä prosessiaineesta ei otettu näytettä vaan aineen koostumus ja tislauskäyrä saatiin vanhasta simulointimallista. Näytteen ottaminen uuniin tulevasta prosessiaineesta on mahdotonta, koska suoraan uunille tulevassa syöttölinjassa ei ole näytteenottopaikkaa. Prosessiaineeseen sekoitetaan vetyä ja yksikön reaktoreilta palau-tettuja ainevirtoja ennen uunin sisääntuloa, eikä näitä saada otettua samaan näytteeseen. Lisäksi uunin syöttö tulee kahdessa faasissa, jolloin näytettä on mahdotonta saada ku-vaamaan täysin uunissa virtaavaa prosessiainetta. Näin ollen prosessiaineen koostumuk-sen tarkempi analysointi on rajattu pois tässä työssä tapahtuvasta uunimallinnuksesta. Vanha, uunin laskennassa käytetty koostumus ja tislauskäyrä on esitetty kuvan 21 tau-lukoissa sekä piirretty tislauskäyrä kuvassa 22.



Kuva 21 Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön prosessiin BA-10401 virtauskaavio, jossa on esitetty uunin läpi menevät virrat, prosessiarvot sekä tärkeimmät instrumentit. Instrumenttien numeroinnissa on yksinkertaistamisen vuoksi jätetty pois ensimmäiset numerot 104. Mittauksista saadut prosessiarvot on merkitty sinisellä ja simuloinnista saadut prosessiarvot punaisella.



**Kuva 22 Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön 3 prosessiuunin BA-10401 tislauskäyrä. Käyrä on määritetty TBP-menetelmällä vanhassa uunisimulointimallissa.**

Uunisimulointiohjelmasta ja mittauksista saadut tärkeimmät tulokset on esitetty kuvassa 21. TOP-järjestelmästä haetut prosessiarvot on esitetty sinisellä ja simuloinnista saadut arvot punaisella. Uunin prosessiaineen tila saatiin simuloinnissa vastaamaan hyvin mitausdataa lämpötilojen, massavirran ja ulostulopaineen osalta. Simuloinnista saatu prosessiaineen sisääntulolämpötila on kuitenkin 0,066 °C pienempi kuin mittauksista saatu arvo. Tämä lämpötilaero on kuitenkin mitätön suhteessa uunin kokonaislämpötehoon, ja sen vaikutus voidaan jättää huomioimatta. Tarkasteluhetkellä, uunin syötön ollessa 356,1 t/h, prosessiaineen sisääntulolämpötilan muutokset vaikuttavat tarvittavaan lämpötehoon noin 310 kW/°C.

Vaikka prosessiaineelle käytettiin vanhaa koostumusta ja tislauskäyrää, prosessiaineen likaantumiskerrointa muutettiin simulointimallin vanhasta arvosta 0,00053 Km<sup>2</sup>/W arvoon 0,000113 Km<sup>2</sup>/W, jotta malli saataisiin vastaamaan paremmin todellisuutta. Tämän virittämisen perusteena oli uunin tuubien pintalämpötilojen saattaminen lähemmäksi mitattuja arvoja. Mitatuista tuubien pintalämpötiloista haettiin maksimi-arvo, joka oli 408,7 °C, mittausinstrumentilta TIZ10418A. Tämän jälkeen likaantumiskerrointa muuttamalla haettiin simulointiohjelmasta tuubien pintalämpötilan maksimi-arvoksi 408,7 °C.

Tuubien maksimipintalämpötila on siis haettu samaksi ja muut mitatut lämpötilat ovat hieman alle maksimin. Simulointiohjelma laskee saman maksimipintalämpötilan kaikil-

le läpikäynneille, minkä seurauksena simulointitulosten ja mittausarvojen välille muodostui pieniä eroja. Suurimmillaan ero mittausdatan ja simuloinnin välillä on 9,9 °C, joka on noin 2,5 % mitatusta lämpötilasta. Läpikäyntien väliset eroavaisuudet pintalämpötiloissa voivat johtua prosessiaineen virtausmäärien eroista, jolloin prosessiaine jäähtyy osaa tuubeista enemmän. Läpikäyntikohtaista virtausmittausta ei kuitenkaan ole saatavilla, eikä virtausmäärän vaikutusta voida näin ollen todeta. Myös samassa läpikäynnissä olevien mittausinstrumenttien välillä on pieniä eroja, jotka johtuvat instrumenttien erilaisesta sijoittelusta. Tuubien pintalämpötilamittaukset on sijoitettu peräkkäin, lähelle tuubien ulostuloa. Myös simulointiohjelma määrittää tuubien pintalämpötilat ulostulokohdassa, joten näiden tarkastelukohdat eivät poikkea toisistaan merkittävästi.

Eniten poikkeavuutta simulointitulosten ja mittautulosten välillä on savukaasujen lämpötilamittauksissa. Suurin ero on säteilyosan alaosassa, jossa simulointi antoi 237 °C ja 41,9 % suuremman lämpötilan kuin mittaamalla saatu arvo. Muualla uunissa lämpötilaerot ovat hieman pienempiä. Lämpötilaeroihin vaikuttaa savukaasujen lämpötilamittauksen ja simuloinnin tarkastelupisteiden erilainen sijainti. Simulointiohjelmalla saadaan määritettyä savukaasujen lämpötila säteilyosan alaosassa, konvektio-osan ja säteilyosan rajalla sekä konvektio-osan jälkeen. Myös lämpötilamittaukset TI10439, TI10440 ja TI10441 on sijoitettu näihin kohtiin uunia, joten tarkastelupisteiden korkotasoissa ei pitäisi olla suurta eroa. Lämpötilamittaukset on kuitenkin sijoitettu lähelle uunin seinämiä, jolloin savukaasujen lämpötila on pienempi johtuen seinämien ja seinämille sijoitettujen tuubien jäähdyttävästä vaikutuksesta. Prosessiuunin säteilyosan sisähalkaisija on 5948 mm ja konvektio-osan yläosan syvyys lämpötilamittauselementtiin TI10441 nähden 2400 mm. Sen sijaan mittauselementin TI10439 uunin sisään jäävän osan pituus on noin 160 mm, mittauselementin TI10440 uunin sisään jäävän osan pituus noin 170 mm sekä TI10441 uunin sisään jäävän osan pituus noin 220 mm. Näistä mittauksista TI10439 on asennettu uunin pohjaan, minkä seurauksena se jää polttimista lähtevän savukaasuvirran katvealueelle. Muut mittaukset eivät ole yhtä selkeästi sivussa suorasta savukaasuvirtauksesta. Kuten luvussa 6.3.1 todettiin, myös prosessiuunissa BA-10401 lämmönsiirron vastukset rajoittavat mittausanturin lämpötilan nousua savukaasujen lämpötilaan.

Simulointiohjelman määrittämä tarvittava polttokaasuvirta vastaa myös melko hyvin mitattua arvoa. Saatujen arvojen välinen ero on noin 29,4 kg/h, joka vastaa noin 2,9 % osuutta mitatusta polttokaasuvirrasta. Polttokaasun virtausmittaus FC10414 tehdään coriolis-massavirtausmittarilla, joka on mitoitettu molekyylipainolle 16,2 g/mol. Massavirtausmittari huomioi kuitenkin molekyylipainon muutokset, joten mittaustulosta ei tarvitse korjata polttokaasunäytteestä määritetylle molekyylipainolle. Mitatun ja simuloitun polttokaasuvirtauksen ero on kohtuullisen pieni, ja sen vaikutus prosessiuunin palamisilmavirtaan voidaan olettaa vähäiseksi. Näin ollen simuloinnista saatua palamisilmamäärää voidaan pitää hyvänä arviona uunin tarvitsemasta ilmamäärästä.

Uunin BA-10401 savukaasut virtaavat samaan savupiippuun raakaöljyn tislausyksikön (RT3) uunien BA-10101A&B kanssa. Jotta uunin veto saataisiin mallinnettua simuloinnissa oikein, lisättiin RT3:n uunien savukaasuvirtaus simulointimallissa olevan piipun alkuun. Tulipesän alaosassa simulointimallista saatu veto on selkeästi suurempi uunin pohjasta instrumentilla PCA10444 mitattu veto. Simuloidun arvon ja mitatun arvon välinen ero on 115 Pa, joka vastaa noin 21,3 % mitatusta vedosta.

Simulointiohjelmasta saatiin prosessiuunin palamisilmavirraksi 20056,7 kg/h annetulla määrän savukaasun happipitoisuudella 2,65 til-% ja ilman lämpötilalla 10 °C. Luonnonvedosta johtuen käytännön mittausdataa ilmavirrasta ei ole saatavilla, eikä simuloinnista saatua arvoa voida verrata mitattuun ilmavirtaan. Simuloinnista saatua ilmavirtaa voidaan kuitenkin käyttää mitattujen ilmavuotojen suuruusluokan arviointiin.

### 6.3.3 MHC-tislausosan prosessiuuni BA-75001

Pohjaöljy-yksikön (PÖY) MHC-tislausosan prosessiuunia BA-75001 käytetään jakotislauskolonnin DA-75002 syötön kuumennukseen sekä jalostamon korkeapaine- ja matalapainehöyryn tulistamiseen. Kuvassa 23 on esitetty prosessiuuniin läpi menevät virrat, tärkeimmät apulaitteet sekä instrumentointi. Prosessiuuni on tyypiltään laatikkomallinen uuni, jossa prosessiaine virtaa kahdessa läpikäynnissä vain uunin suoja- ja säteilytuubiryhmien läpi. Konvektio-osan tuubiryhmissä tulistetaan jalostamon käyttöhöyryä kolmessa eri paineluokassa. Normaalisissa ajotilanteissa simulointiohjelmasta saatu poltto-teho on 32,67 MW ja kuumennettaviin ainevirtoihin absorboitunut lämpöteho 29,73 MW. Prosessiuunin hyötysuhde on tällöin 88,2 %, jossa ei ole huomioitu ilman esiläm-mitykseen käytettävää höyryä.

Ilma- ja savukaasukierto uunissa on toteutettu pakkovetona. Palamisilma lämmitetään höyryllä ilman esilämmittimessä EA-75016X noin 97–99 °C:een, minkä jälkeen ilma virtaa palamisilmapuhaltimelle GB-75001X. Puhaltimen jälkeen ilma jaetaan palamisilmakanavassa 10 polttimelle, jotka on sijoitettu yhteen riviin prosessiuunin pohjaan. Jokaisella polttimella on erikseen säädettävä ilmarekisteri, jolla voidaan ohjata polttimen välistä ilmajakoa sekä säätää polttimelle tulevan ilman määrää.

Ilma- ja savukaasukierron ohjauksen kannalta prosessiuunin olennaisimmat instrumentit ovat palamisilman happianalysaattori ACA75001 sekä vetomittaus PCA75013. Vetomittaus voidaan tehdä sekä säteilyosan ala- että yläosasta. Mittauslähettimiä on kuitenkin vain yksi, minkä vuoksi operoinnissa seurattava kohde tulee valita. Yleensä tästä uunista mitataan säteilyosan alaosan vetoa, joka on tyypillisesti noin 80–90 Pa alipainetta. Vetoa säädetään savupiipun alaosassa olevalla kaksiosaisella savupellillä PV75013. Happianalysaattorilla säteilyosan yläosasta mitattu ylimäärähappi on tyypillisesti noin 1,6–1,8 til.-%. Happianalysaattorin ja palamisilman virtausmittauksen FCA75055 perusteella säädetään palamisilmapuhallinta ja polttimille syötettävän ilman määrää. Prosessiuunin savukaasut virtaavat lopuksi savupiippuun CA-75001, joka on sijoitettu suoraan konvektio-osan päälle. Savupiippuun on johdettu savukaasukanavat myös uuneista BA-73001 ja BA-71003.

Prosessiuunin BA-75001 simuloinnin lähtötiedot kerättiin TOP-järjestämästä 10 minuutin keskiarvona ajalta 12.3.2015 kello 01.00–01.10. Samalla ajanhetkellä otettiin myös näytteet sekä prosessiaineesta että polttokaasusta. Prosessiaineen näytteenotto kuitenkin epäonnistui, eikä uutta näytettä onnistuttu ottamaan ennen Porvoon jalostamon seisokkia 2015. Tämän vuoksi simulointiohjelmassa käytettiin uunin suunnittelussa käytettyjä aineominaisuuksia.

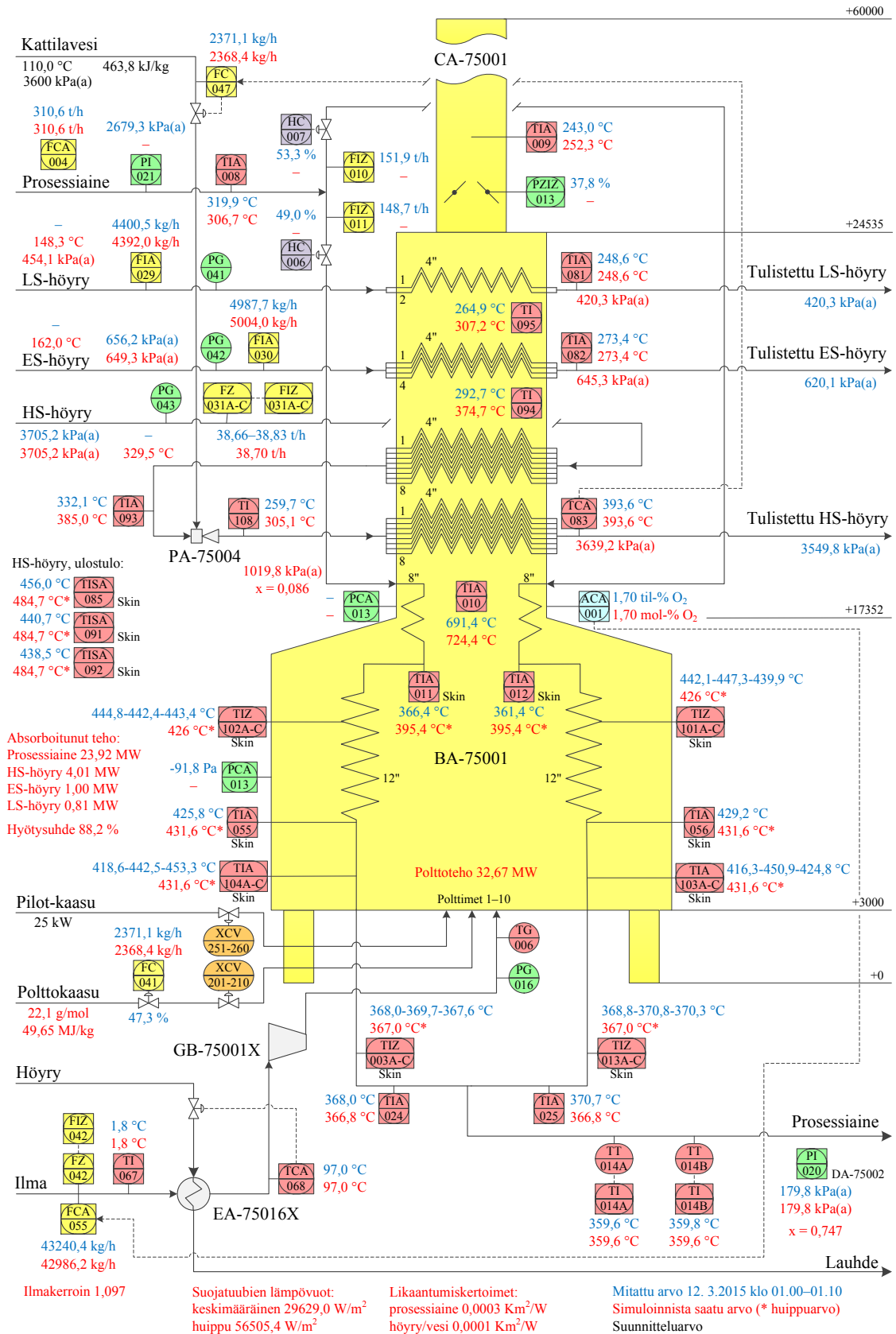
Uunin polttokaasunäytteestä määritetty koostumus, molekyylipaino ja lämpöarvo on esitetty taulukossa 4. Simulointiohjelmaan on syötetty pelkästään polttokaasun koostumus, jonka perusteella ohjelma laskee molekyylipainon ja lämpöarvon. Ohjelman laskemat molekyylipaino ja lämpöarvo on esitetty simulointitulosten yhteydessä kuvassa 23.

**Taulukko 4 Pohjaöljy-yksikön prosessiuunin BA-75001 polttokaasun koostumus 12.3.2015 otetun näytteen perusteella.**

Polttokaasun koostumus 12.3.2015		
Vety	45,70	mol-%
Typpi	0,10	mol-%
Metaani	14,80	mol-%
Etaani	13,10	mol-%
Propaani	12,00	mol-%
Propeeni	0,10	mol-%
I-Butaani	3,80	mol-%
N-Butaani	4,50	mol-%
I-Pentaani	1,70	mol-%
N-Pentaani	1,30	mol-%
C6+RASK	3,00	mol-%
Molekyylipaino	22,15	g/mol
Lämpöarvo	49,60	MJ/kg

Prosessiuunin tärkeimmät simulointitulokset sekä TOP-järjestelmästä kerätty mittausdata on esitetty kuvassa 23. Simulointitulokset on esitetty punaisella ja prosessin mittausarvot sinisellä. Simulointimallin virittäminen mittaustietoja vastaavaksi oli hyvin vaikeaa, koska uunin kautta kulkevia virtoja on yhteensä neljä. Epäonnistuneen näytteenoton ja vanhojen prosessiaineen aineominaisuuksien vuoksi prosessiaineen ja konvektio-osan höyryjen tiloja ei saatu samanaikaisesti vastaamaan mittaustietoja. Näin ollen päädyttiin jättämään prosessiaineen vaatima teho pois laskennan lähtötiedoista. Koska polttokaasuanalyysi oli hyvin tuore, luotettiin polttokaasusta mitattuun lämpöarvoon ja polttokaasun virtausmittaukseen FC75041, ja syötettiin näiden perusteella saatu polttoteho simulointiohjelman lähtötiedoksi. Virtausmittaus FC75041 on muiden uunien tapaan coriolis-massavirtausmittaus, joka huomioi polttokaasun molekyylipainon muutokset. Polttotehon perusteella simulointiohjelmalla saatiin laskettua prosessiaineen ja höyryjen tilat.





**Kuva 23 MHC-tislausosan prosessiuunin BA-75001 virtauskaavio, jossa on esitetty uunin läpi menevät virrat sekä tärkeimmät instrumentit ja apulaitteet. Instrumenttien numeroinnissa on yksinkertaistamisen vuoksi jätetty pois ensimmäiset numerot 75. Mittauksista saadut prosessiarvot on merkitty sinisellä ja simuloinnista saadut prosessiarvot punaisella.**

Prosessiaineen ulostulolämpötila ja -paine saatiin vastaamaan täysin mitattuja arvoja. Sen sijaan simuloinnin sisääntulolämpötila on 13,2 °C pienempi kuin mitattu lämpötila, mitä voidaan pitää merkittävänä erona mallin ja mittausten välillä. Tämä johtuu kuitenkin simulointiohjelman ja todellisen prosessiaineen erilaisista tislauk käyristä, minkä vuoksi prosessiaineen lämpötilan muutos on erilainen, vaikka absorboitunut lämpöteho olisikin sama. Höyryjen osalta simuloinnin vertaaminen mitattuihin arvoihin on hankalaa, koska höyryjen instrumentointi on selkeästi puutteellisempaa kuin prosessiaineella. Höyryjen ulostulolämpötilat saatiin vastaamaan mitattuja lämpötiloja, mutta sisääntulolämpötiloille ei ollut mitattua vertailukohtaa. Höyryjen painemittaukset ovat kaukana höyrylinjoissa, kun taas simulointiohjelma antaa paineet suoraan uunin ulostulossa. Lisäksi uunisimulointiohjelmassa on tuubimäärä rajoitettu, joten kaikille höyryille ei voitu rakentaa siirtolinjaa painemittaukselle asti. ES-höyrylle ja HS-höyrylle rakennettiin vuorottain sisääntulon siirtolinjat eri simulointimalleihin, joiden avulla saatiin höyryn ulostulopaine laskettua. Lopullisessa simulointimallissa HS-höyryn paine on laitettu vastaamaan mitattua sisääntulopainetta höyrylinjassa ja ES-höyryn tila haettu iteroiden kohdalleen käyttämällä useita simulointimalleja. Uunin välittömässä läheisyydessä olevien mittausinstrumenttien puuttumisen ja simulointiohjelman rajoitteiden takia höyryjen tiloja ei voida juurikaan verrata simuloinnin ja mittausten välillä.

Simuloinnista saatu savukaasujen lämpötila konvektio-osan alaosassa on instrumentilta TIA75010 mitattua lämpötilaa 33 °C suurempi, joka vastaa noin 4,8 % mitatusta lämpötilasta. Ero simuloinnin ja mittausten välillä on siis melko pieni verrattuna muille prosessiuuneille tehtyihin simulointeihin. Konvektio-osan tuubiryhmien välissä lämpötilaerot mittausinstrumenttien TI75094 ja TI75095 ja simuloinnin välillä kuitenkin kasvavat ollen suurimmillaan 82 °C ja noin 28,0 % mitatusta lämpötilasta. Mittausinstrumentin TI75010 uunin sisään jäävän osan pituus on noin 210 mm ja mittausinstrumenttien TI75094 ja TI75095 uunin sisään jäävän osan pituus 380 mm. Konvektio-osan syvyys mittausinstrumentteihin nähden on 2054 mm, joten mittausinstrumentit ovat savukaasuvirtauksen reunoilla, mikä selittää simulointituloksia pienemmät mitatut lämpötilat.

Tuubien pintalämpötilat simulointimallissa vastaavat vaihtelevasti mitattuja lämpötiloja. Prosessiaineen ulostulossa, säteilyosan alaosan virtaussuunnassa viimeiset lämpötilamittaukset TIA75104B–C ja TIA75103B näyttävät liian korkeaa lämpötilaa simulointiin

nähdessä, kun taas muut mittaukset näyttävät hieman liian alhaista lämpötilaa. Ero mitatun ja simuloidun arvon välillä on suurimmallaan 19,3 °C, joka on noin 4,3 % mitatusta lämpötilasta. Pintalämpötilamittaukset TIZ75102A–C ja TIZ75101A–C on sijoitettu kuudenteen tuubiriviin säteilyosan pohjasta laskettuna. Näiden osalta simulointimalli antaa selkeästi pienempiä lämpötiloja kuin mittaukset. Suurin ero on kuitenkin prosessiaineen suojatuubiryhmän viimeisten tuubien pintalämpötilamittauksissa TIA75011 ja TIA75012 sekä HS-höyryn tuubiryhmän alimpien tuubien pintalämpötilamittauksissa TISA75085, TISA75091 ja TISA75092. Näissä kohdissa simulointimallin pintalämpötila on selkeästi korkeampi ollen suurimmillaan 46,2 °C ja 10,5 % korkeampi kuin mitattu lämpötila. Pintalämpötilojen osalta uunin mallinnus ei siis vastaa yhtä hyvin todellista tilannetta kuin uuneissa BA-501 ja BA-10401. Toisaalta simuloinnin lähtötietojen puutteellisuus ja uuniin tulevien ainevirtojen lukumäärä lisäävät mallinnukset vaikeutta.

Polttokaasun virtausmäärä uunisimuloinnissa vastaa hyvin mitattua polttokaasuvirtausta, sillä eroa on vain 2,7 kg/h. Tämä ero johtuu kuitenkin siitä, että uunin polttoteho oli asetettu simuloinnin lähtötiedoksi. Simulointiohjelman laskema polttokaasun lämpöarvo poikkeaa 0,05 MJ/kg laboratoriossa mitatusta lämpöarvosta, mikä vastaa täysin polttokaasun virtausmäärän eroa. Mikäli simulointiohjelman laskema lämpöarvo olisi ollut täysin sama, polttokaasun määräkin olisi täysin sama.

Koska simulointimallin polttokaasun virtausmäärä, lämpöarvo ja molekyylipaino vastaavat hyvin mitattuja arvoja, voidaan simulointiohjelman laskemaa palamisilmamäärää pitää hyvänä arviona tarvittavalle ilmamäärälle. Ilman virtausmittauksen FCA75055 mittaama ilmavirta oli tarkasteluhetkellä 42239,9 kg/h. Virtausmittauksen suunnittelulämpötila on kuitenkin 15 °C, eikä venturi-tyyppinen mittaus huomioi lämpötilan vaihtelua. Ulkoilman molekyylipainon, paineen ja kokoonpuristuvuuden voidaan kuitenkin olettaa pysyvän vakioina. Virtausmittauksen korjaaminen oikeaan lämpötilaan 1,8 °C voidaan tehdä kaavalla:

$$\dot{m}_K = \dot{m}_M \sqrt{\frac{T_D}{T_M}} \quad (47)$$

Missä:

$\dot{m}_K$	lämpötilakorjattu ilman massavirta (kg/s)
$\dot{m}_M$	mitattu ilman massavirta (kg/s)
$T_D$	instrumentin suunnittelulämpötila (K)
$T_M$	mitattu ilman lämpötila (K)

(Peramanu & Wah 2011)

Tällöin todelliseksi, lämpötilakorjatuksi ilmavirraksi saadaan 43240,4 kg/h. Todellinen ilmavirta on siis 254,2 kg/h suurempi kuin simuloinnista saatu ilmavirta. Tämä ero on kuitenkin mitätön, sillä se vastaa noin 0,6 % lämpötilalla korjatusta mitatusta ilmavirrasta. Simulointimallin ja mittausten välistä eroon vaikuttaa kuitenkin myös mittausten hieman suurempi polttokaasuvirtaus. Täten simulointitarkastelun perusteella ja mallin puutteiden rajoissa voidaan todeta, ettei prosessiuunissa ole merkittäviä ilmapuotoja.

## 7 Ilmavuotojen kokeellinen mittaaminen

Ilmavuotojen kokeellisella mittaamisella voidaan määrittää prosessiuunin kuoressa olevan aukon läpi vuotava ilmamäärä. Samalla voidaan arvioida, kuinka hyvin luvussa 4.2 johdettua teoriaa voidaan soveltaa käytäntöön. Luvussa 5.2 esitetyistä mahdollisista vuotokohdista valittiin tarkasteltaviksi uunien tarkastusluukut. Tarkastusluukuista vuotavan ilmavirran mittaaminen on luotettavampaa kuin esimerkiksi saumakohtien tai tuubiläpivientien, koska mittalaitteen tiivistäminen tarkastusluukun ympärille on helpompaa. Täten kaikki uunin sisäpuolelle virtaava ilma saadaan kulkemaan mittalaitteen kautta. Kokeelliseen mittaamiseen soveltuvia tarkastusluukkuja on kaikissa tässä työssä käsiteltävissä prosessiuuneissa.

### 7.1 Mittauslaitteisto ja mittaustekniikka

Prosessiuunien ilmavuotojen mittaamiseksi suunniteltiin yksinkertainen laitteisto, joka oli mahdollista saada käyttöön ennen jalostamon suurseisokkia. Kuvassa 24 on esitetty käytetty mittalaitteisto, johon kuuluu teräksinen mittaussuppilo sekä siipipyöräänemometri.



**Kuva 24** Prosessiuunien ilmavuotojen mittaamiseen käytetty laitteisto: tiivistekumilla varustettu teräksinen mittaussuppilo ja Airflow AV-2 siipipyöräänemometri.

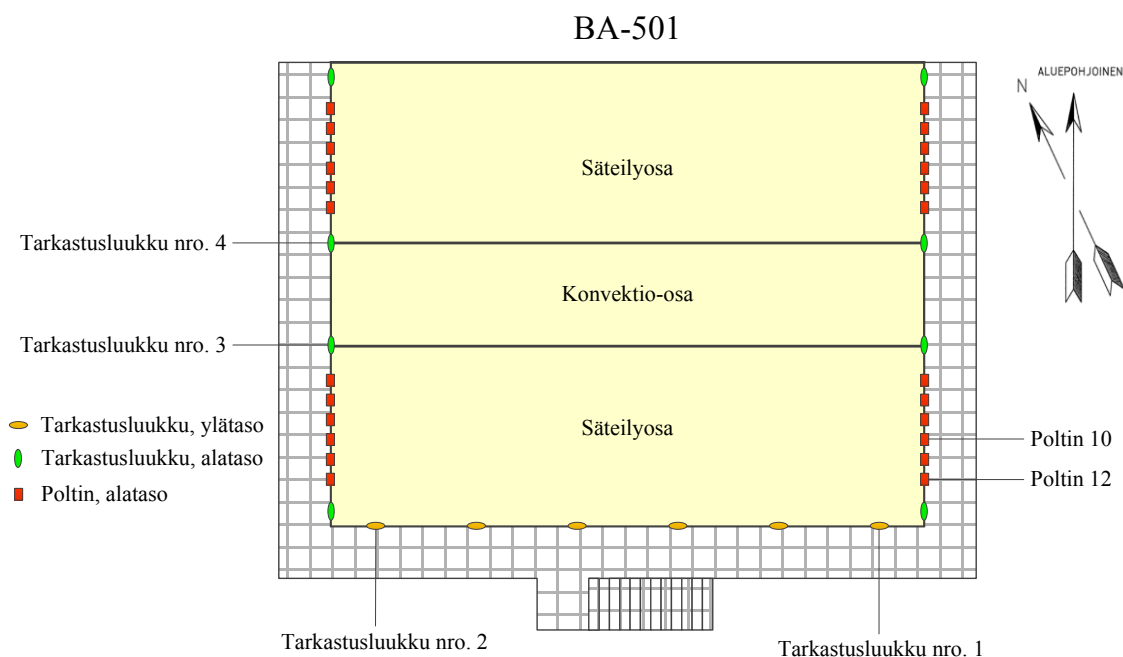
Mittaussuppilo rakennettiin Nesteen omissa tiloissa suunniteltujen mittojen mukaan. Suppilon päätyjen halkaisijat ovat 500 mm ja 106 mm sekä pituus 700 mm. Suurempaan päätyyn liimattiin solukumia, jotta laite saataisiin tiivistettyä paremmin prosessiuunin pintaan. Suppilon pituussauma tehtiin myös mahdollisimman ilmatiiviiksi. Näin ollen voitiin olettaa, että kaikki tarkastusluukkujen vuotoilma saadaan kulkemaan suppilon läpi. Mittaussuppilosta aiheutuu kuitenkin painehäviö vuotoilmavirtaukselle, mikä aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin. Todellinen vuotoilmavirta ilman mittaussuppiloa on siis suurempi kuin mittaustilanteessa suppilon ollessa paikallaan.

Vuotoilman virtausmittaukseen käytettiin Airflow AV-2 -siipipyöranemometriä. Laitteessa on 100 mm siipipyörä, jolla voidaan mitata ilmavirran nopeutta väliltä 0,25–30 m/s. Valmistajan mukaan laitteen mittaustarkkuus on vähintään  $\pm 1$  % mittarin osoittamasta lukemasta tai  $\pm 0,01$  m/s riippuen mitatusta nopeudesta. Valmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on annettu lämpötilassa 20 °C ja paineessa 101,3 kPa olevalle ilmalle. Mittari soveltuu 50–200 kPa ja -10–60 °C mittausolosuhteisiin, mutta laitteen käyttöohjekirjassa ei ole selvitetty, ottaako laite huomioon olosuhteiden muutokset verrattuna kalibrointiolosuhteisiin. Kuitenkin siipipyörästä aiheutuvan virtausvastuksen laite kompensoi automaattisesti. Mittalaitteeseen voidaan syöttää myös mitatun kanavan pintala, jolloin näytöltä voidaan lukea myös suoraan tilavuusvirta. Tähän työhön liittyvissä mittauksissa käytettiin kuitenkin vain ilmavirran nopeusmittausta.

Kentällä tehtävissä mittauksissa etsittiin prosessiuuneista sopivimmat tarkastusluukut, joiden päälle mittaussuppilon suurempi pääty saatiin hyvin asetettua ja tiivistettyä. Tämän jälkeen siipipyöranemometri asetettiin suppilon kapeammalle päädylle ilmavirran mittaamista varten. Ilmavirran virtausnopeutta mitattiin noin 20–30 sekunnin keskiarvoina, jotta tuulen puuskista ja anemometrin asettelusta suppilon suulle johtuvat virtausnopeuden heilahdukset eivät näkyisi mittaustuloksissa. Mittauksen aikana seurattiin jatkuvasti päivittyvää virtausnopeuden keskiarvolukemaa, ja odotettiin että lukema pysyy likimain vakiona. Tällöin voitiin olettaa ulkoisten häiriötekijöiden vaikutus mittaustulokseen pieneksi. Kullekin tarkastelukohteelle ja -tapaukselle tehtiin kahdesta neljään mittausta, jotta voitiin sulkea pois selkeästi toisista poikkeavat ja oletettavasti virheelliset mittaustulokset.

## 7.2 Tarkastusluukut ja poltinluukut, BA-501

Kaasuöljyn jakotislausyksikön prosessiuunille BA-501 suoritettiin ilmapuotomittaukset 30.3.2015 kello 10.15–11.30 sekä tarkastusluukuille että polttimien tarkastusluukuille. Mitatuista säteilyosan tarkastusluukuista kaksi sijaitsi poltintasossa ja kaksi säteilyosan yläosassa. Polttimien tarkastusluukut sijaitsivat polttimien takapuolella olevassa polttimien kiinnityslevyssä. Tarkastusluukkujen sijainnit on esitetty tarkemmin kuvassa 25.



**Kuva 25** Prosessiuunin BA-501 tarkastusluukkujen sijainnit. Yläosan tarkastusluukut on merkitty oranssilla, alaosan tarkastusluukut vihreällä ja polttimet punaisella.

Kuvassa 26 on esitetty tarkastelukohteena olevien säteilyosan tarkastusluukkujen rakenne. Näitä luukkuja voidaan tutkia kahdessa eri tilanteessa: luukun suojapellin ollessa kiinni ja suojapellin ollessa nostettuna ylös. Suojapelti on sijoitettu uunin ulkokuoren sisäpuolelle, jolloin sen irrottaminen mittauksen ajaksi on mahdotonta. Suojapellin ja ulkokuoren välissä on selkeä välys, jonka kautta vuotoilma pääsee virtaamaan prosessiuuniin. Normaalitilanteessa tarkastusluukun suojapelti on kiinni.





**Kuva 26 Prosessiuunin BA-501 tarkastusluukku suojaletti kiinni ja suojaletti avattuna.**

Prosessiuunin polttimen tarkastusluukku on esitetty kuvassa 27. Avatun luukun vuotoaukon halkaisija on 50 mm, ja ilma pääsee virtaamaan tämän aukon läpi suoraan polttimelle. Mittaukset tehtiin polttimen 12 avatulle tarkastusluukulle sekä polttimen 10 tarkastusluukulle, josta puuttui kansilevy. Polttimien tarkastusluukkujen ympäristössä on kuitenkin polttoainelinjoja ja kiinnitysrakenteita, jotka estävät mittaussuppilon käytön. Tämän vuoksi mittaukset jouduttiin tekemään suoraan luukun päältä pelkkää siipipyöräanemometria käyttäen.



**Kuva 27 Prosessiuunin BA-501 avattu polttimen tarkastusluukku.**



Taulukossa 5 on esitetty prosessiuunin BA-501 tarkastusluukkujen ilmapuotomittausten tulokset. Virtausnopeudet on esitetty kunkin tilanteen mittaustapahtumien keskiarvona. Virtausnopeuden perusteella on laskettu tilavuusvirta käyttäen virtauspinta-alana säteilyosan tarkastusluukuille mittaussuppilon kapeamman päädyn pinta-alaa (halkaisija 106 mm). Sen sijaan polttimien tarkastusluukkujen tilavuusvirran laskemiseksi on käytetty luukkujen aukon pinta-alaa (halkaisija 50 mm). Vuotoilman massavirran laskemisessa on käytetty ilman tiheytenä  $1,293 \text{ kg/m}^3$  ( $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ja massavirtaa on edelleen verrattu simuloinnista saatuun teoreettiseen palamisilmavirtaan. Kaikki yksittäiset mittaustulokset on esitetty liitteessä 2.

**Taulukko 5 Prosessiuunin BA-501 tarkastusluukkujen ilmapuotojen mittaustulokset ja vuotoilma-virtausten osuus uunisimuloinnin palamisilmavirtauksesta. Tarkastusluukut 1 ja 2 sijaitsevat uunin säteilyosan yläosassa ja tarkastusluukut 3 ja 4 uunin poltintasossa. Ulkoilman lämpötila mittaus-hetkellä oli  $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja mitattu veto uunin säteilyosan yläosassa 30 Pa alipainetta.**

Tarkastusluukku	Nopeus (m/s)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)	Massavirta (kg/h)	Osuus pala- misilmasta
Nro. 1	0,90	28,70	37,11	0,07 %
Nro. 1, suojapecti ylhäällä	1,17	37,06	47,92	0,09 %
Nro. 2	0,66	21,07	27,25	0,05 %
Nro. 2, suojapecti ylhäällä	0,93	29,44	38,07	0,07 %
Nro. 3	1,36	43,05	55,66	0,10 %
Nro. 3, suojapecti ylhäällä	1,19	37,91	49,02	0,09 %
Nro. 4	1,22	38,86	50,25	0,09 %
Nro. 4, suojapecti ylhäällä	1,41	44,69	57,78	0,10 %
Poltin 10	1,06	7,49	9,69	0,02 %
Poltin 12	1,11	7,85	10,15	0,02 %

Tuloksista voidaan huomata, että tarkastusluukut vuotavat selkeästi luukun suojaelevyn ollessa sekä alhaalla että ylhäällä. Poltintasossa olevat tarkastusluukut 3 ja 4 vuotavat selkeästi enemmän kuin säteilyosan yläosan luukut 1 ja 2. Poltintason suurempi vuotoilmavirtaus voi johtua suuremman vuotopinta-alan lisäksi myös suuremmasta vedosta. Myös samassa tasossa olevien tarkastusluukkujen vuotomäärissä on pieniä eroja. Suojapectin nostaminen ylös, pois tarkastusluukun lasin edestä kasvattaa vuotoilmamäärää hieman lukuun ottamatta tarkastusluukkua 3. Suojapectin ja uunin seinämien välissä on välystä, niin että suopelti pääsee liikkumaan selkeästi myös syvyys suunnassa. Liikku-minen syvyys suunnassa vaikuttaa vuotopinta-alaan riippumatta siitä onko suojapecti alhaalla vai nostettu ylös. Näin ollen suojapectin asento syvyys suunnassa vaikuttaa myös mittaustuloksiin ja voi aiheuttaa eroja luukkujen ja mittaustilanteiden välille. Suojapecti-

lin asentoa syvyysuunnassa on hyvin hankala kontrolloida, minkä vuoksi kaikkien mitaustapahtumien suorittaminen samassa asennossa on vaikeaa.

Polttimien tarkastusluukkujen mittaaminen ei onnistunut täysin luotettavasta, koska mittaussuppilaa ei voitu käyttää. Näin ollen kaikkea vuotoilmavirtaa ei saatu kulkemaan anemometrin läpi, ja saatu vuotoilmavirtaus on pienempi kuin todellinen vuotoilmavirtaus. Mittaustuloksista voidaan kuitenkin huomata, että polttimen tarkastusluukuissa on selkeästi erottuva vuotoilmavirtaus.

Tarkastusluukuista mitattuja ilmavirtoja on verrattu luvussa 6.3.1 esitettyyn uunisimuloinnista saatuun palamisilmavirtaan. Vuotoilmavirtausten osuudet palamisilmavirrasta on esitetty taulukossa 5. Tulosten perusteella tarkastusluukkujen kautta vuotava ilmamäärä on hyvin pieni suhteessa uunin kokonaisilmamäärään. Luvussa 6.3.1 arvioitiin prosessiuunin ilmavuotojen kattavan 17,3 % koko palamisilmavirrasta. Tarkastusluukuista mitattujen vuotojen osuus tästä määrästä on häviävän pieni, ja mahdollisia vuoto- paikkoja on syytä etsiä muualta. Tarkasteltavien prosessiuunien vuotokohtia on kartoitettu luvussa 8.

### **7.3 Tarkastusluukut, BA-10401**

Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön 3 prosessiuunille BA-10401 suoritettiin kahden eri tarkastusluukun ilmavuotomittaukset 24.3.2015 kello 11.30–13.00. Mitatut tarkastusluukut sijaitsivat uunin eri puolilla, noin 1,3 metrin korkeudella uunin säteilyosan sisäpohjasta. Mittaussuppilon suurempaa päätyä muokattiin mukailemaan sylinterin muotoisen prosessiuunin pintaa, jotta suppilon tiivistäminen luukkujen ympärille onnistuisi paremmin. Mittausaikana ulkoilman lämpötila oli keskimäärin 10 °C ja prosessiuunin veto säteilyosan sisäpohjan tasolla noin 540 Pa alipainetta, jota voidaan pitää hyvin suurena vetona.

Kuvassa 28 on esitetty prosessiuunin BA-10401 mitattujen tarkastusluukkujen rakenne ja mahdollisuudet luukun raottamiseen. Tarkastusluukuissa on alas taittuva teräskehysinen lasikansi sekä lasikantta suojaava sivulta ulosvedettävä teräslevy. Näitä raottamalla on mahdollisuutta muuttaa vuotopinta-alaa ja tutkia erilaisia vuototilanteita. Normaa-

lissa käyttötilanteessa luukkujen kannen sekä suojalevyn pitäisi olla paikallaan kuten kuvan 28 vasemmanpuoleisessa luukussa.



**Kuva 28** Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukku kiinni ja lähes täysin auki.

Molemmista käsiteltävistä tarkastusluukuista mitattiin vuotoilmavirrat kolmessa samantyyppisessä tilanteessa:

- Kansi ja sivulevy paikallaan
- Kansi paikallaan, mutta sivulevy poistettuna
- Kansi ja sivulevy poistettuna

Taulukossa 6 on esitetty mittaustulokset molemmille tarkastusluukuille kussakin tilanteessa. Taulukossa esitetyt virtausnopeudet ovat suoritettujen mittauksien keskiarvoja kullekin tilanteelle. Liitteessä 3 on esitetty kaikki yksittäiset mittaustulokset. Mitatusta virtausnopeuksista on laskettu tilavuusvirta käyttäen virtauspinta-alana suppilon kaapeaman päädyn pinta-alaa (halkaisija 106 mm), johon anemometri oli asetettu. Vuotoilman massavirta on laskettu käyttäen ilman tiheytenä  $1,249 \text{ kg/m}^3$  ( $10^\circ\text{C}$ ), ja massavirtaa on edelleen verrattu simuloinnista saatuun palamisilmavirtaan 19,4 t/h.

**Taulukko 6 Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukkujen ilmapuotojen mittaustulokset. Virtausnopeudet on esitetty kunkin tilanteen mittaustapahtumien keskiarvoina. Ulkoilman lämpötila mittaushetkellä oli 10 °C ja mitattu veto uunin säteilyosan pohjalla 540 Pa alipainetta.**

Tarkastusluukku	Nopeus (m/s)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)	Massavirta (kg/h)	Osuus palamisilmasta
Nro. 1, kansi ja sivulevy paikallaan	1,46	46,49	58,06	0,29 %
Nro. 2, kansi ja sivulevy paikallaan	1,38	43,84	54,76	0,27 %
Nro. 1, sivulevy poistettu	8,68	275,65	344,29	1,72 %
Nro. 2, sivulevy poistettu	5,69	180,87	225,91	1,13 %
Nro. 1, kansi ja sivulevy poistettu	27,04	859,11	1073,03	5,35 %
Nro. 2, kansi ja sivulevy poistettu	25,18	799,84	999,00	4,98 %

Yllä esitetyistä tuloksista voidaan huomata, että prosessiuunin tarkastusluukuista on mitattavissa selkeä vuotoilmavirtaus, vaikka luukut olisivatkin täysin suljettu. Suljettujen luukkujen vuotoilman osuus simulointiohjelman antamasta palamisilmavirrasta on hyvin pieni, joten sen vaikutus palamisprosessiin ovat todennäköisesti hyvin pieni. Virtauspinta-alan kasvattaminen luukun sivulevyn poistamisella ja kannen avaamisella lisäävät kuitenkin vuotoilman määrää hyvin paljon. Yhden luukun kautta kulkeva vuotoilmavirtaus on tällöin yli 5 % koko uunin palamisilmamäärästä. Näin suuren vuotoilman vaikutuksia palamisprosessiin voidaan varmasti havaita ainakin savukaasujen happianalysaattorin avulla.

Mittausaikana kello 11.00–12.15 happianalysaattorin mittaama ylimäärähappi oli TOP-järjestelmästä saatujen tietojen mukaan pääosin noin 2,55–2,70 til-%, keskiarvon ollessa noin 2,63 til-%. Kuitenkin välillä kello 12.15–12.25 ylimäärähapen määrä kohosi välille 2,68–2,85 til-%, keskiarvon ollessa noin 2,76 til-%. Mittaukset, joissa tarkastusluukun kansi oli avattuna, suoritettiin viimeisenä, mikä tukee ylimäärähapen nousun osumista samalle ajanjaksolle. Mittaushetkellä ei kuitenkaan tarkkailtu kelloa, joten tarkkaa määrittystä tarkastusluukun kannen aukioloajalle on mahdotonta tehdä. Näin ollen ei voida täysin luotettavasti tehdä johtopäätöksiä, vaikuttiko tarkastusluukun kannen avaaminen ja suuri vuotoilmavirta happianalysaattorin lukemaan.

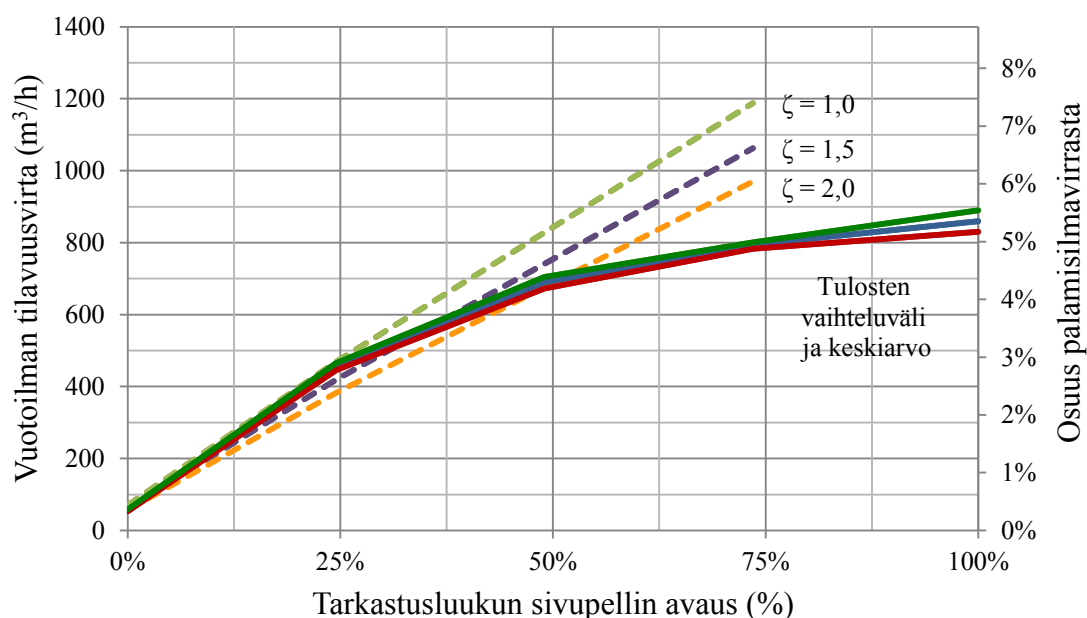
Tässä prosessiuunissa tarkastusluukkuja on yhteensä kahdeksan kappaletta, joten luukkujen kautta vuotava kokonaisilmavirran voidaan olettaa olevan noin kahdeksankertainen yhden luukun ilmavuotoon nähden. Tällöin kokonaisvuotoilmavirta kasvaa nopeasti hyvinkin suureksi, jos luukut ovat raollaan. Tästä johtuen luukkujen tiiveyden ja huolellisen sulkemisen merkitys korostuu.

Mittaustuloksista voidaan huomata myös tarkastusluukkujen vuotoilmamäärien välillä olevan eroa. Tarkastusluukun 2 kautta virtaa kaikissa mittaustilanteissa vähemmän vuotoilmaan uunin sisäpuolelle. Selkein ero on havaittavissa tilanteessa, jossa pelkästään luukun teräksinen sivulevy on poistettu. Tästä voidaan päätellä, että tarkastusluukun 2 sivulevyille tehty aukko voi olla pienempi ja tarkastusluukun 2 sovite tiiviimpi kuin tarkastusluukun 1. Näiden seurauksena tarkastusluukun 2 vuotopinta-ala on pienempi kuin tarkastusluukun 1. Nämä eroavaisuudet voivat osittain poistua sivulevyn ollessa paikallaan, koska sivulevy tiivistää tarkastusluukun saumoja joka reunaltaan. Vastaavasti luukkujen välisen vuotopinta-alojen ero voi olla häviävän pieni suhteessa kokonaisvuotopinta-alaan tilanteessa, jossa sekä kansi että sivulevy on poistettu. Lisäksi prosessiuunin veto voi vaihdella tulipesässä, minkä seurauksena vuotoilmaa ajava paine-ero ei ole yhtä suuri molempien tarkastusluukkujen yli.

Prosessiuunin BA-10401 kiinni olevien tarkastusluukkujen vuotoilmavirtaukset ovat hieman suurempia kuin taulukossa 5 esitetyt prosessiuunin BA-501 säteilyosan tarkastusluukkujen vuotoilmavirtaukset. Toisaalta myös prosessiuunin BA-10401 veto on huomattavasti suurempi kuin prosessiuunin BA-501 veto. Prosessiuunin BA-10401 palamisilmamäärä on myös selkeästi pienempi, ja siten ilmavuotojen osuus uuniin virtaavasta ilmamäärästä on huomattavasti suurempi.

Tarkastusluukulle 1 suoritettiin lisäksi mittauksia, joissa luukun kansi avattiin kokonaan ja tämän jälkeen sivupeltiä vedettiin ulos asteittain. Näiden mittausten tarkoituksena oli tutkia tarkemmin vuotopinta-alan vaikutusta vuotoilmavirtaan. Tarkastusluukun aukon korkeus on 192 mm ja leveys 102 mm. Sivupeltiä ulos vetämällä vaikutettiin aukon leveyteen, jolloin aukon vuotopinta-ala muuttui välillä 0–0,020 m<sup>2</sup>. Tämän lisäksi ilma pääsi vuotamaan myös luukun saumakohdista.

Kuvassa 29 on esitetty tarkastusluukun sivupellin avauksen vaikutus vuotoilman määrään luukun kansi avattuna. Käyrät on piirretty tehtyjen mittausten keskiarvolukemista sekä pienimmistä ja suurimmista mittaustuloksista. Sivupellin ollessa täysin suljettuna (0 %) mittausten keskimääräinen vuotoilmavirta on noin  $56 \text{ m}^3/\text{h}$  (0,36 % palamisilma-  
virrasta), joka on hieman vain hieman suurempi kuin edellä esitetty mittaustulos luukun kannen ollessa kiinni. Kun tarkastusluukun sivupeltiä vedetään ulos ja aukon vuotopinta-ala alkaa kasvaa, myös vuotoilmavirta kasvaa nopeasti. Vuotoilmakäyrän kulmakerroin kuitenkin pienenee ja ilmavirran kasvu hidastuu, kun vuotopinta-alan kasvaa yhä suuremmaksi. Näin ollen vuotopinta-alan vaikutus vuotoilman määrään on kaikkein suurinta käyrän alkuvaiheilla, pienillä sivupellin avauksilla ja vuotopinta-alan arvoilla.



**Kuva 29** Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukun sivupellin avauksen vaikutus vuotoilmamäärään luukun kansi avattuna. Teoreettiset vuotokäyrät  $\zeta = 1,0\text{--}2,0$  on määritetty vedolla 540 Pa alipainetta.

Luvussa 4.2.1 johdetun teorian ja kaavan (31) mukaan vuotoilman määrä on suoraan verrannollinen vuotokohdan pinta-alaan. Kuvassa 29 on piirretty kaavan (31) mukaiset lineaariset vuotokäyrät arvioidulla kertavastuskertoimilla  $\zeta = 1,0\text{--}2,0$ . Näissä teoreettisissa käyrissä virtauspinta-alana on käytetty tarkastusluukuista arvioitua vuotopinta-alaa kullakin sivupellin avauksella. Arvioidut vuotopinta-alat on esitetty luvun 7.5 taulukossa 8.

Mittaustuloksena saatujen käyrien tulisi myös olla täysin lineaarisia, jos muutoksia uunin vedossa tai aukon kertavastuskertoimessa ei tapahdu. Prosessiuunin veto vaihteli saadun mittausdatan perusteella hieman, mutta sen voidaan olettaa olevan melko vakio. Sen sijaan kertavastuskertoimen muuttuminen voi tässä tapauksessa aiheuttaa suurimman osan mittauskäyrien ja teorian välisestä erosta. Mittauskäyrien perusteella kertavastuskerroin kasvaa voimakkaasti vuotopinta-alan kasvaessa ja siten myös vuotoilman virtausnopeuden kasvaessa. Sivupellin avauksilla 0–50 % mitattu vuotoilmavirtaus osuu melko hyvin kertavastuskerroinkäyrien  $\zeta = 1,0\text{--}2,0$  väliin. Avauksen kasvaessa yli 50 %:n mittauskäyrä ei enää mukaile teoriasta johdettuja käyriä ja kertavastuskertoimen arviointi käyrien perusteella on vaikeampaa. Kertavastuskertoimen muutokset voivat johtua mittaussuppilon virtausta kuristavasta vaikutuksesta. Suppilon kapeampi pääty saattaa olla mitoitukseltaan liian pieni suurimmille mitatuille vuotoilmamäärille, minkä vuoksi suppilo kasvattaa kertavastuskerrointa huomattavasti. Pienemmillä virtausmäärillä suppilon vaikutus kertavastuskertoimeen voidaan olettaa pieneksi.

### 7.3.1 Tarkastusluukun virtaussimulointi ja mittaustulosten korjaus

Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukkujen vuotomittauksissa huomattiin, että luukun ja mittaussuppilon kertavastuskerroin kasvaa huomattavasti vuotomäärän kasvaessa. Jotta mittaussuppilon virtausta kuristavaa vaikutusta voitaisiin tutkia, tehtiin uunin tarkastusluukulle CFD-virtaussimulointi (engl. computational fluid dynamics) yhteistyössä Neste Jacobs Oy:n kanssa. Virtaus mallinnettiin Helyx 2.2.0 -ohjelmalla tilanteissa, joissa tarkastusluukun kansi oli avattu ja sivupeltiä raotettiin 50 mm (49 %), 75 mm (74 %) ja 102 mm (100 %). Nämä tilanteet laskettiin sekä mittaussuppilolla että ilman mittaussuppiloa. CFD-Simulointimallissa uunin vetoa jouduttiin kasvattamaan mitattua arvoa korkeammaksi, jotta nopeus suppilon kapeammassa päädyssä vastaisi anemometrillä mitattua nopeutta. Lopulta vedoksi valittiin 885 Pa alipainetta, jolloin tarkastusluukun ja sivulevyn ollessa täysin auki ilmavirran nopeus oli 27,12 m/s, joka poikkesi noin 0,29 % mitatusta ilmavirrasta. Pienemmillä sivulevyn raotuksilla nopeudet poikkesivat hieman enemmän mitatuista.

Taulukossa 7 on esitetty CFD-virtaussimuloinnin tulokset eri tarkastelutilanteissa sekä suppilolla että ilman. Tuloksista voidaan huomata suppilon vaikuttavan paljon aukon läpi menevään ilmavirtaan. Suppilon vaikutus vuotoilmavirtaan kasvaa mitä enemmän

luukkua raotetaan ja mitä suuremmaksi ilmavirta kasvaa. Suurimmillaan vuotoilmavirtaus ilman suppiloa on yli kaksinkertainen suppilon läpi kulkevaan virtaukseen nähden.

**Taulukko 7 Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukun CFD-simuloidut vuotoilmavirtaukset eri tarkastelutilanteissa. Virtausnopeudet on määritetty suppilon kapeammassa päädyssä.**

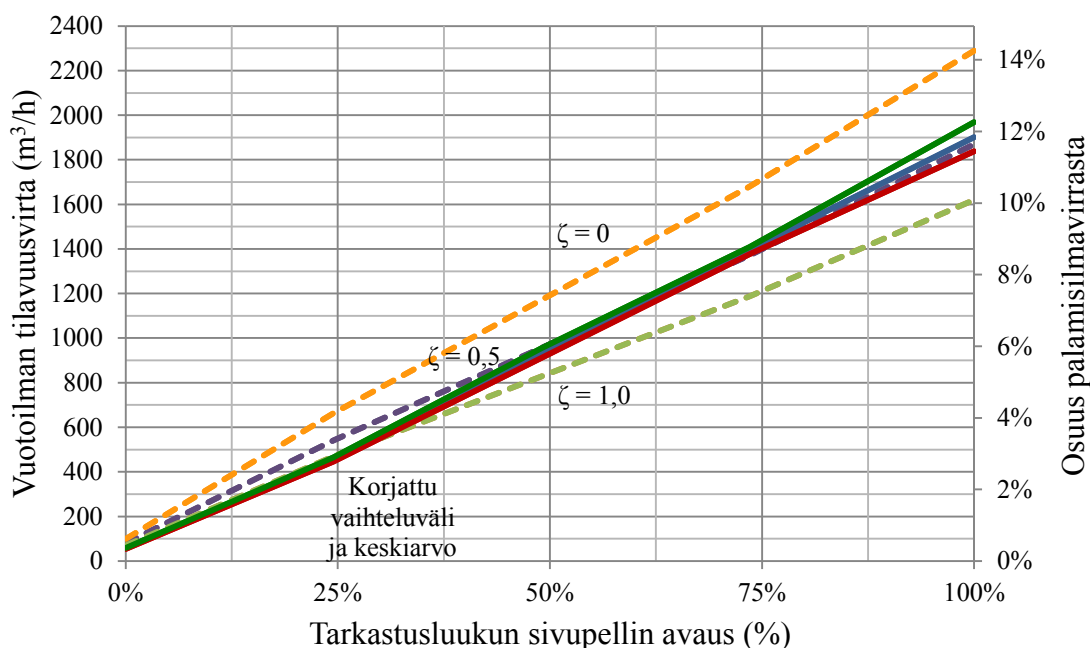
Tarkastusluukku nro. 1	Mittaussuppilo kiinnitettynä		Ilman suppiloa	Ero
	Nopeus (m/s)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)	
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 50 mm	20,75	611,00	828,00	36 %
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 75 mm	25,39	762,00	1336,00	76 %
Kansi ja sivulevy poistettu	27,12	809,00	1794,00	121 %

Näiden tulosten perusteella voidaan arvioida suppilon aiheuttamaa virtausvastusta ja korjata uunin BA-10401 tarkastusluukuista mitattuja tuloksia. CFD-simulointimallissa vuotoaukkojen ja mittaussuppilon virtauspinta-alat sekä uunin veto tiedetään tarkasti. Näin ollen kaavasta (31) voidaan ratkaista kertavastuskerroin  $\zeta$  ja määrittää tarkastusluukun vuotoaukkojen kertavastuskerroin ilman mittaussuppiloa. Lisäksi voidaan määrittää myös suppilon kertavastuskerroin, joka on määritelty nopeudelle suppilon suulla. Näiden kertavastuskertoimien perusteella lasketaan korjauskertoimet, joilla mittaussuppilon virtausvastus voidaan poistaa vuotoilmavirtauksesta. Korjauskertoimia käytettäessä uunin vetoa ei tarvitse tietää mittaustilanteessa, mikä tekee niiden käytöstä helpompaa kuin pelkkien kertavastuskerrointen käyttö. Korjauskertoimien laskenta ja CFD-mallille lasketut kertavastuskertoimet on esitetty liitteessä 4.

Kuvassa 30 on esitetty CFD-simuloinnin perusteella korjatut vuotoilmakäyrät. Korjaukset on tehty ainoastaan simuloituihin sivupellin 50–102 mm avauksiin. Tehtyjen korjausten jälkeen vuotoilmakäyrät ovat melkein lineaarisia ja sopivat näin ollen yhteen teorian kanssa. Kuvan teoreettiset vuotoilmakäyrät on piirretty vedon ollessa 540 Pa alipainetta. Korjauksen jälkeen vuotoilmamäärä kasvoi huomattavan paljon ollen suurimmillaan jopa 2,21-kertainen mitattuun vuotoilmamäärään nähden. Samalla vuotoilmamäärä vastaa yhä suurempaa osaa palamisilmamäärästä. Vuotoaukon teoreettinen kertavastuskerroin on huomattavasti pienempi kuin ennen korjausta, ja korjatut vuotokäyrät



sijoittuvatkin pääosin kertavastuskertoimilla  $\zeta = 0,5-1,0$  määritettyjen teoreettisten käyrien väliin. Kertavastuskertoimen määrittämistä on käsitelty tarkemmin luvussa 7.5.



**Kuva 30** Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukun korjatut vuotoilmavirtaukset eri sivupellin avaumilla. Teoreettiset vuotokäyrät  $\zeta = 0,5-1,0$  on määritetty vedolla 540 Pa alipainetta.

## 7.4 Tarkastusluukut, BA-75001

Pohjaöljy-yksikön prosessiuunin BA-75001 tarkastusluukkujen ilmavuotomittauksia varten valmistettiin suurempi mittaussuppilo. Mittaukset suoritettiin 3.4.2015 kello 12.00–13.00 kolmessa eri tasossa oleville tarkastusluukuille. Valtaosassa uunin tarkastusluukuista uunin muut rakenteet estivät mittauslaitteiden paikoilleen asettamisen. Mittaustuloksina virtausnopeuden vaihteluväli oli  $-0,25-0,25$  m/s, jossa negatiivinen nopeus kuvaa virtausta mittaussuppilosta ulospäin. Mittaustulokset olivat osittain siipipyöräanemometrin mittausalueen ulkopuolella. Tämän vuoksi vuotoilman nopeudesta ei saatu kunnon lukemia ja selkeää vuotoilmavirtausta ei ollut. Koska selkeän sisäänvirtaus puuttui, tuuli häytti mittauksia selvästi ja käänsi välillä virtaussuunnan suppilosta ulospäin. Näin ollen mitattuja vuotoilmavirtauksia ei voida pitää luotettavina ja mittauksen perusteella prosessiuunin BA-75001 tarkastusluukkuja voidaan pitää vuotamattomina.

## 7.5 Kertavastuskertoimen määrittäminen

Vuotoaukon kertavastuskerroin voidaan määrittää saatujen mittausten perusteella ratkaisemalla kaavasta (31) vuotoilmavirran, vedon ja vuotopinta-alan suhteen. Näistä suureista etenkin vuotopinta-alan määrittäminen voi olla hyvin vaikeaa. Selkeitä ja helposti määritettäviä vuotoaukkoja on prosessiuuneissa hyvin vähän. Lisäksi vuotoilmavirtauksen mittaaminen luotettavasti voi olla tällaisista aukoista tilanpuutteen takia lähes mahdotonta. Tutkituista tarkastusluukuista ainoastaan uunin BA-10401 tarkastusluukkujen sekä vuotoilmamäärä että vuotopinta-ala pystyttiin arvioimaan kohtuullisesti. Vuotopinta-alan arviointi on kuitenkin vaikeaa etenkin luukun ollessa suljettuna, ja pienetkin mittausvirheet voivat kattaa hyvin ison osuuden pienestä vuotopinta-alasta. Kun luukua avataan, vuotopinta-ala kasvaa ja mittausvirheiden osuus pienenee.

**Taulukko 8** Prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukun mitatut ja korjatut ilmavuotovirtaukset, arvioitu vuotopinta-ala sekä laskettu kertavastuskerroin eri tarkastelutilanteissa.

Tarkastusluukku nro. 1	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)	Pinta-ala (cm <sup>2</sup> )	Kertavastuskerroin $\zeta$	
			$\Delta p = 540 \text{ Pa}$	$\Delta p = 885 \text{ Pa}$
Kansi ja sivulevy paikallaan	46,49	14,64	3,52	6,41
Sivulevy poistettu	275,65	24,90	-0,09	0,50
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 0 mm	56,44	14,64	2,07	4,03
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 25 mm	456,31	62,64	1,11	2,46
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 50 mm	934,41	110,64	0,57	1,57
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 75 mm	1397,60	158,64	0,44	1,37
Kansi ja sivulevy poistettu	1901,43	216,29	0,45	1,38

Taulukossa 8 on esitetty prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukusta mitatut vuotoilmavirrat, arvioitu vuotopinta-ala sekä niiden perusteella lasketut kertavastuskertoimet. Kertavastuskertoimet on laskettu sekä mitatulla vedolla (540 Pa) että CFD-simuloinnin vedolla (885 Pa). Tuloksista voidaan huomata, että vedon suuruus vaikuttaa merkittävästi kertavastuskertoimeen. Suuremmalla vedolla myös kertavastuskertoimet ovat suu-

remmat. Kertavastuskerroin myös pienenee vuotopinta-alan kasvaessa, mikä johtuu vuotoaukon muodon muutoksesta ja epätarkkuuksista pinta-alan arvioinnissa.

Kertavastuskertoimen yksiselitteinen määrittäminen uunin BA-10401 tarkastusluukuille on mahdotonta, koska uunin tarkkaa vetoa ei tiedetä. CFD-simuloinnin veto ja mitattu veto poikkeavat toisistaan hyvin paljon, ja lisäksi seisokin aikana huomattiin uunin vetomittauksen impulssiputken olevan tukkeutunut. Varmasti ei voida kuitenkaan sanoa, onko vetomittaus ollut tukossa myös ilmavuotojen mittaushetkellä. Lisäksi vetomittaus sijaitsee vedon mittaamisen kannalta huonossa paikassa, uunin pohjassa.

Koska lasketut kertavastuskertoimet vaihtelevat paljon, suljetaan pois mittaustilanteet, joissa vuotopinta-ala on pienin ja pinta-alan arvointivirhe suhteessa vuotopinta-alaan suurimmillaan. Täten käsitellään vain tilanteita, joissa luukun kansi on avattu ja sivulevyä raotetaan. Näiden tapausten perusteella voidaan todeta kertavastuskertoimen asettuvan vedosta riippumatta välille  $\zeta = 0,44\text{--}2,46$ . Tälle välille osuvat hyvin myös luvussa 4.2 esitetyt kirjallisuudesta löydetty kertavastuskertoimet. CFD-simuloinnissa vuotoaukon kertavastuskertoimet asettuivat vastaavilla vuotopinta-aloilla välille  $\zeta = 1,56\text{--}2,24$ . Tulosten perusteella on mahdotonta osoittaa, mitä tiettyä kertavastuskertoimen arvoa vuotoaukoille tulisi käyttää. Yllä esitetyt vaihteluvälit mahdollistavat kuitenkin vuotopinta-alan suuruusluokan arvioinnin kohtuullisesti.

## 8 Tarkasteltavien prosessiuunien vuotokohdat

Luvussa 5.2 on esitelty yleisesti prosessiuunien mahdollisia vuotokohtia ja niiden syntyyn johtaneita syitä. Näitä vuotokohtia voidaan kartoittaa myös tässä työssä käsiteltävistä prosessiuuneista. Uunikohtaisen statistiikan laatiminen potentiaalisista vuotokohdista mahdollistaa uunin kokonaisvuotomäärän suuruusluokan arvioinnin.

Tarkasteltavissa prosessiuuneissa vuotokohdat voivat olla hyvin erilaisia, minkä vuoksi niiden vuotopinta-alojen ja kertavastuskertoimien arviointi poikkeaa toisistaan. Prosessiuunien vuotokohdat voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin vuotoilmavirran syvyysuuntaisen kulkeutumisen ja vuotokohdan virtausvastuksen perusteella:

1. Lyhyet vuotoaukot
2. Moniosaiset vuotoaukot
3. Pitkät vuotoaukot

Lyhyitä vuotoaukkoja ovat muun muassa kokonaan avonaiset tarkastusluukut, joissa ilman virtausmatka vuotoaukon läpi on yksiosainen ja hyvin lyhyt. Tällöin aukon aiheuttama painehäviö sekä kertavastuskerroin on pieni, ja aukon vuotopinta-ala pystytään mittaamaan tai arvioimaan. Luvussa 7.5 määritetyt kertavastuskertoimet on määritetty lyhyille vuotoaukoille, ja niitä voidaan soveltaa muihin vastaavanlaisten aukkojen laskentaan.

Moniosaisia vuotoaukkoja ovat esimerkiksi prosessiuunin tuubikäyrien läpiviennit. Tuubikäyrät on sijoitettu uunin ulkopuolelle, mutta peitetty kuitenkin päätylaatikoilla. Tällöin vuotoilman pitää virrata ensin päätylaatikon sisäpuolelle ja edelleen tuubiläpiviennistä uunin sisäpuolelle. Moniosaisten vuotoaukkojen kokonaisvuotopinta-ala ja kertavastuskerroin on vaikea arvioida. Moniosaisia vuotoaukkoja voidaan kuitenkin jakaa useampiin lyhyisiin vuotoaukkoihin, mikä mahdollistaa lyhyille vuotoaukoille määritettyjen kertavastuskertoimien soveltamisen sekä vuotoilmamäärän suuruusluokan arvioimisen.

Pitkissä vuotoaukoissa vuotoilma virtaa kanavamaisessa, pitkässä aukossa ulkoilmasta uunin sisäpuolelle. Tällaisia vuotoaukkoja ovat muun muassa uunin teräskuoressa olevat halkeamat, joiden jälkeen ilma virtaa muurauksen halkeamien kautta uuniin. Tällöin

virtausmatka voi olla hyvinkin pitkä verrattuna lyhyisiin vuotoaukkoihin. Muurauksien paksuudet tässä työssä tarkasteltavissa prosessiuuneissa on esitetty taulukossa 9. Pitkien vuotoaukkojen aiheuttamaa painehäviö tulisi muista aukoista poiketen laskea sisäänvirtauksen, ulosvirtauksen sekä virtauskanavan aiheuttaman kitkapainehäviön summana. Näistä etenkin virtauskanavan kitkapainehäviön arvioiminen on hankalaa, sillä pitkää vuotoaukkoa ei välttämättä pääse tarkastelemaan koko matkaltaan, jolloin kanavan mittojen ja pinnankarheuden määrittäminen on hyvin vaikeaa.

**Taulukko 9 Tarkasteltavien prosessiuunien mahdolliset vuotokohdat.**

Laitetunnus	BA-501	BA-10401	BA-75001
Tarkastusluukut	8 (sauma 170) 4 (sauma 143)	8 (192 x 102)	32 (370 x 270)
Tuubikoko	6"	6"	Syöttö 8"/12" Höyrytuubit 4" Höyrytukit 12"/8"/6"
Tuubien läpiviennit	16	16	6 (12") 8 (8") 2 (6")
Tuubikäyrien läpiviennit	224	128	6 (8") 90 (4")
Räjähdysluukut	–	1	4 (612 x 512)
Miesluukut	4 (1000 x 500) 2 (620 x 620)	1 (730 x 730) 1 (630 x 630)	4 (600 x 600)
Polttimet	24	4	10
Ulkopinta-ala	782 m <sup>2</sup>	384 m <sup>2</sup>	1051 m <sup>2</sup>
Muurauspaksuus	140 mm	150–160 mm	115–235 mm
Muut kohteet	–	4 poistettua poltinta	8 konvektio-osan luukkua (600 x 300)

Taulukossa 9 on esitetty yhteenveto tässä työssä tarkasteltavien prosessiuunien mahdollisista vuotokohdista. Tarkastusluukut, räjähdysluukut sekä miesluukut voidaan luokitella lyhyiksi vuotoaukoiksi, sillä niiden kohdalta puuttuu uunin sisäpuolinen muuraus. Nämä vuotokohdat ovat lisäksi melko helposti löydettävissä sekä korjattavissa paremmalla tiivistämisellä.

Tuubien läpivienniksi lasketaan sekä prosessiaineen ja höyryjen sisään- ja ulostulokohdat että konvektio-osan ja säteilyosan väliset siirtotuubit (engl. crossovers). Tuubien läpiviennit menevät yleensä uunin kuoren lisäksi myös päätylaatikon läpi. Tuubikäyrät on sijoitettu uunin kuoren ulkopuolelle, mutta kuitenkin päätylaatikoiden sisäpuolelle. Tuubikäyrät eivät siis suoraan aiheuta vuotoaukkoa uuniin, mutta usein päätylaatikot eivät ole täysin tiiviitä, jolloin vuotoilma pääsee virtaamaan päätylaatikkoon ja edelleen tuubikäyrän aukon kautta uuniin. Tuubien läpiviennit sekä tuubikäyrien läpiviennit voidaan luokitella moniosaisiksi vuotoaukoiksi. Näiden vuotoaukkojen havaitseminen prosessiuunin käynnin aikana voi olla vaikeaa, joten nämä kohdat olisi syytä tarkistaa yksikön seisokin aikana.

Polttimien kotelot ja ilmarekisterit ovat myös mahdollisia vuotokohtia, joskin näiden kautta vuotava ilma virtaa kuitenkin polttimille, jolloin se osallistuu palamistapahtumaan. Polttimien kautta kulkevaa vuotoilmaa ei kuitenkaan voida kontrolloida palamisilman tapaan. Prosessiuunista poistettujen polttimien aukot, kuten KARP3:n uunissa BA-10401 voivat myös vuotaa ilman kunnollista tiivistämistä. Polttimien vuotoaukot voivat olla sekä lyhyitä että moniosaisia vuotoaukkoja.

Taulukon 9 tietojen perusteella voidaan laskea mahdollisten vuotosaumojen kokonaispituus. Vuotosaumojen leveys voi puolestaan vaihdella hyvin paljon, joten saumaleveyden ja edelleen kokonaisvuotopinta-alan arvioiminen pelkästään статистиikan perusteella on vaikeaa. Vuotosaumat voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin: pulteilla kiristettävät saumat ja kiristämättömät saumat. Pulteilla kiristettäviä saumoja on miesluukuissa, joissakin tarkastusluukuissa (BA-75001) sekä polttimien kotelossa. Näissä saumoissa on tavallisesti myös eristenuhaa. Kiristämättömiä luukkuja ovat räjähdysluukut ja osa tarkastusluukuista (BA-501 ja BA-10401). Tällaiset kiristämättömät luukut voivat olla täysin eristämättömiä. Lisäksi on tuubiläpivientejä ja muita saumoja, joita ei käytännössä pystytä kiristämään millään vaan ne pyritään tiivistämään eristevillalla. Eristevillalla tehtävät tiivistykset eivät kuitenkaan välttämättä ole täysin tiiviitä, ja ovat näin ollen hyvin todennäköisiä vuotokohtia.

Taulukossa 10 on laskettu tarkasteltavien prosessiuunien vuotosaumojen kokonaispituus. Kokonaismäärän osalta vuotosaumoja on eniten lämpöteholtaan suurimmassa uunissa ja vastaavasti vähiten lämpöteholtaan pienimmässä uunissa. Uuni BA-75001 on

selkeästi muita uuneja uudempi, mikä näkyy kiristettävien luukkujen määrässä ja edelleen saumapituudessa. Uunin BA-75001 tuubien ja tuubikäyrien läpivientien saumamäärä vertailun selkeästi pienin korkeasta lämpötehosta huolimatta. Prosessiaineen tuubikäyrät ovat tässä uunissa ulkokuoren sisäpuolella, joten ainoat saumakohdat ovat läpiviennit ja pienempien (4") höyrytuubien läpivientien saumat. Höyrytukkien saumoja ei ole laskettu tuubiläpivienteihin, koska höyrytuki on sijoitettu vain päätylaatikoiden sisäpuolelle, eivätkö uunin kuoren sisäpuolelle. Myös uunin BA-10401 säteilyosan tuubikäyrät on sijoitettu uunin sisäpuolelle, joten ainoat tuubikäyrien läpiviennit ovat konvektio-osan päätylaatikoiden sisäpuolella.

**Taulukko 10 Tarkasteltavien prosessiuunien mahdollisten vuotokohtien saumapituudet.**

Laitetunnus	BA-501	BA-10401	BA-75001
Tuubiläpiviennit ja tuubikäyrät (m)	126,88	76,13	42,61
Kiristettävät luukut (m)	16,96	5,44	64,96
Kiristämättömät luukut (m)	1,93	4,70	8,99
Saumojen kokonaispituus (m)	145,77	86,27	116,56

Uunien BA-10401 ja BA-501 luukkujen mitat ovat kentällä mitattuja ulkomittoja, sillä näistä uuneista ei ollut saatavilla laitekuvia, joissa olisi esitetty luukkujen mitat tarkasti. Lasketuissa saumamäärissä ei myöskään ole näiden uunien osalta huomioitu räjähdysluukkuja, sillä niiden mittaaminen on mahdotonta, koska luukun edustalla ei ole hoitotähtä. Sen sijaan uunin BA-75001 kiristämättömien luukkujen saumapituudessa on huomioitu myös räjähdysluukut.

## **8.1 Havaitut vuotokohdat**

Nesteen Porvoon jalostamolla toteutettiin keväällä 2015 koko jalostamon kattava seisokki, mikä mahdollisti alas ajettujen prosessiuunien tarkastelun. Tilaisuus oli diplomi-työn kannalta hyvin ainutlaatuinen, sillä vastaavia seisokkeja on noin viiden vuoden välein. Kaikki tässä työssä käsitellyt prosessiuunit päästiin tarkastamaan sisäpuolelta, jolloin voitiin tarkastella luvussa 5.2 selvitettyjä vuotokohtia. Seisokissa uunit olivat käyntijaksonsa lopussa, mikä tuli huomioida uunien kuntoa ja vuotokohtia arvioidessa. Esimerkiksi tuubiläpivientien eristevillat ovat huonoimmassa kunnossa ja uunin tulipesä

likaisimmillaan juuri tarkastuksen aikana. Näin ollen seisokkitilanne ei siis vastaa koko edellisen käyntijakson tilannetta.

Prosessiuunien sisäpuolinen tarkastelu rajoittui säteilyosien tarkastukseen. Uunit BA-501 ja BA-75001 tarkastettiin vain uunin pohjalta, kun taas uuniin BA-10401 sisäpuolelle oli rakennettu telineet, mikä mahdollisti yksityiskohtaisen tarkastelun konvektioosan alaosaan asti. Uunien sisällä ei ollut valaistusta, minkä vuoksi vuotokohdista uuniin näkyvä päivänvalo auttoi vuotokohtien löytämisessä. Seisokissa tehtyjen tarkastusten perusteella vuotoja löydettiin vanhemmista uuneista BA-501 ja BA-10401. Sen sijaan uunista BA-75001 ei löydetty yhtään vuotokohtaa. Tässä luvussa ei käsitellä uunien tarkastusluokkuja, sillä niiden vuotoja on selvitetty jo luvussa 7.

### 8.1.1 Vuotokohdat, BA-501

Kaasuöljyn jakotislausyksikön prosessiuunin BA-501 tuubikäyrien läpiviennit ovat hyvin selkeä vuotokohta. Pimeän uunin sisäpuolelle näkyi selkeästi päivänvaloa tuubien läpien ja uunin kuoren välisistä raoista. Tuubikäyrät sijaitsevat tässä uunissa päätylaatikkojen sisäpuolella, mutta päätylaatikot eivät ole riittävän tiiviitä ehkäistäkseen ilman vuotamisen täysin. Seisokin aikana päätylaatikot kuitenkin avattiin, mikä mahdollisti läpivientien vuotokohtien tarkemman dokumentoinnin.



Kuva 31 Prosessiuunin BA-501 säteilyosan katon tuubikäyrät länsipään päätylaatikko avattuna.



Kuvassa 31 on prosessiuunin BA-501 säteilyosan päätylaatikko avattuna. Kuvasta voidaan huomata päätylaatikkojen luukkujen kiinnityslevyjen olevan huonosti tiivistettyjä, vaikka itse luukut onkin tiivistetty. Myös tuubikäyrien ja uunin seinämän väliset tiivistämättömät raot ovat selkeästi erotettavissa kuvasta. Keskimmäisten tuubikäyrien kohdalla on uunin seinämän sauma, jota ei myöskään ole tiivistetty. Tuubikäyrien rakojen koossa oli selkeää vaihtelua. Osa tuubikäyristä oli huomattavasti tiiviimpiä kuin toiset. Kaikkein suurimmat raot olivat säteilyosan seinämällä olevissa tuubikäyrissä, joissa rakoja tuubin ja teräskuoren välillä oli paikoin jopa 30–40 mm. Sen sijaan tiiveimmät tuubikäyrien läpiviennit olivat konvektio-osassa.

### 8.1.2 Vuotokohtat, BA-10401

Kaasuöljyn rikinpoistoyksikön prosessiuunista BA-10401 sisäpuolinen tarkastus onnistui muita uuneja paremmin sisäpuolelle koottujen telineiden ansiosta. Tästä uunista löydettiin eniten vuotokohtia. Säteilyosan tuubien ulostulon läpivienneissä oli havaittavissa selkeitä rakoja tuubin ja uunin muurauksen välillä, mutta silmämääräisesti arvioiden raot olivat hieman pienempiä kuin uunissa BA-501. Säteilyosan tuubikäyrät on puolestaan sijoitettu uunin sisäpuolelle, ja konvektio-osan päätylaatikoita ei avattu ollenkaan seisokissa, joten niiden tarkastaminen ei ollut mahdollista.



Kuva 32 Prosessiuunin BA-10401 säteilyosan katon ja sivuseinän välisen sauman vuotokohta.

Uunin kuoresta löydettiin lisäksi kaksi vuotokohtaa. Aivan konvektio-osan alimman tuubirivin alapuolella oli uunin kuoressa reikä josta näkyi selvästi päivänvaloa. Reikä oli konvektio-osan reunan pohjatasanteessa, ja paikka on hyvin ahdas, minkä vuoksi reiän koon arvioiminen ja hyvän valokuvan ottaminen kohteesta oli mahdotonta ilman

suurempia purkutöitä. Toinen uunin kuoren vuotokohta löydettiin säteilyosan katon ja sivuseinän välisestä saumasta. Tämä vuotokohta on esitetty kuvassa 32. Saumaa oli paikattu aiemminkin, mutta vuodon pystyi havaitsemaan yhä selkeästi. Uunin ollessa käynnissä saumasta tuntui selkeä veto, ja lisäksi seisokin aikana uunin sisäpuolinen muuraus oli sauman kohdalta kostea.

## 9 Vuotoilma ja sen aiheuttamat kustannukset

Luvussa 6 on selvitetty prosessiuunin kokonaisvuotomäärää ja -palamisilmamäärää simulointiohjelman avulla. Luvussa 7 puolestaan on selvitetty kokeellisten mittausten ja CFD-virtaussimuloinnin avulla uunin tarkastusluukkujen vuotoilmavirtauksia sekä vuotoaukkojen kertavastuskertoimia. Näissä luvuissa käytettyjä menetelmiä ja saatuja tietoja voidaan soveltaa prosessiuunien ilmavuotojen määrittämiseen.

**Taulukko 11 Tarkasteltujen prosessiuunien ilmavuototarkastelun tärkeimmät vertailukohdat.**

Laitetunnus		BA-501	BA-10401	BA-75001
Valmistusvuosi		1964	1974	2005
Vetotapa		Pakkoveto	Luonnonveto	Pakkoveto
Polttoteho	MW	37,75	14,23	32,67
Mitattu veto	Pa	-28,4	-540	-91,8
Simuloitu ilmamäärä	kg/h	55248,5	20056,7	42986,2
Mitattu ilmamäärä	kg/h	45714,7	–	43240,4
Vuotoilmamäärä	kg/h	9533,8	–	–
Simuloitu ilmakerroin	–	1,227	1,162	1,097
Mitattu ilmakerroin	–	0,964	–	–
Savukaasujen happipitoisuus	til-%	3,57	2,65	1,70
Ulkoilman lämpötila mittaus- hetkellä	°C	2,9	10,0	1,8
Mitattu yksittäisen tarkastus- luukun vuoto	kg/h	27,25–55,66	54,76–58,06	–
Vuotosaumojen pituus	m	145,77	86,27	116,56

Taulukossa 11 on esitetty tässä työssä käsiteltyjen prosessiuunien vuototarkastelun yhteenvedo. Vuotojen arviointi simuloinnin avulla pystyttiin suorittamaan pakkovetouuneille BA-501 ja BA-75001. Simulointi osoitti, että uunin BA-501 tarvitsemasta palamisilmavirrasta 17,3 % (9533,8 kg/h) vuotaa vähintäänkin virtausmittauksen ohi. Sen sijaan uunista BA-75001 ei simulointitarkastelun perusteella löytynyt merkittäviä ilma-

vuotoja. Vastaavanlaista vuotojen arviointia ei voitu suorittaa uunille BA-10401, koska uunilta ei ole saatavissa mittaustietoa palamisilmamäärästä.

Lisäksi ilmavuotoja mitattiin prosessiuunien tarkastusluukuista. Selkeitä vuotoilmavirtauksia saatiin mitattua uuneista BA-501 ja BA-10401. Uunissa BA-501 vuotoilmavirtaukset vaihtelivat melko paljon yksittäisten luukkujen välillä. Yksittäisessä luukussa vuotoilman määrä oli suurimmillaan noin 0,10 % palamisilman määrästä. Sen sijaan uunin BA-10401 tarkastusluukkujen vuotomäärissä oli vähemmän eroja ja vuotomäärät täysin kiinni oleville luukuille olivat suurimmillaan 0,29 % uunin palamisilmamäärästä. Uunin BA-75001 tarkastusluukuista ei löydetty vuotoja tehtyjen mittausten perusteella.

Prosessiuunien ilmavuotojen kokonaisvaltainen määrittäminen voidaan tehdä hyödyntämällä tässä työssä tuotettua mallinnustietoa sekä kokeellista mittaustietoa. Tällöin ilmavuotojen arviointimenetelmä sisältää seuraavat vaiheet:

1. Kokonaisvuotomäärän laskenta simuloinnin avulla
2. Vuotopinta-alan laskeminen kertavastuskertoimien avulla
3. Uunikohtaisen statistiikan kerääminen vuotokohdista

Kokonaisvuotomäärän selvittämiseksi uunin hetkellinen ajotilanne mallinnetaan, niin että se vastaa mahdollisimman hyvin uunilta saatavaa mittaustietoa. Kokonaisvuotomäärä saadaan mallista saatavan palamisilmamäärän ja mitatun todellisen ilmamäärän erotuksena. Tämän jälkeen voidaan vuotomäärän ja uunin vedon perusteella määrittää vuotopinta-ala luvussa 4.2.1 johdetun kaavan (31) avulla. Vuotopinta-alaa voidaan edelleen verrata uunikohtaiseen statistiikkaan, jossa on eritelty kaikki mahdolliset vuotokohdat. Näin ollen saadaan selvitettyä uunin vuotomäärä, vuotopinta-ala sekä todennäköiset vuotokohdat.

Prosessiuunille BA-501 toteutettuna tämä menetelmä antaa simulointimallin perusteella vuotoilmavirraksi 9533,8 kg/h (2,6483 kg/s). Kaavasta (31) voidaan ratkaista vuotopinta-ala, ja sijoittaa siihen simulointihetken mukainen veto, ilman tiheys sekä kokeellisesti määritetty kertavastuskerroin:

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho \sqrt{\frac{2}{\rho(1+\zeta)}} \sqrt{p_1 - p_2}} \quad (48)$$

Missä:

$A$	vuotokohdan poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ )
$\dot{m}$	vuotoilmavirta (2,6483 kg/s)
$p_1 - p_2$	uunin veto (28,4 Pa)
$\rho$	ilman tiheys ( $1,293 \text{ kg/m}^3$ , $0 \text{ }^\circ\text{C}$ )
$\zeta$	vuotoaukon kertavastuskerroin (1,5)

Täten prosessiuunin vuotopinta-alaksi saadaan noin  $0,49 \text{ m}^2$ . Jos tätä verrataan uunin vuotosaumojen pituuteen 145,77 m, saadaan vuotopinta-alan kattavaksi saumaleveydeksi 3,35 mm. Kun tarkastellaan taulukossa 10 esitettyjä vuotokohtien saumapituuksia, voidaan huomata tuubiläpivientien ja tuubikäyrien kattavan 87 % vuotosaumoista. Näin ollen voidaan siis olettaa, että valtaosa uunin arvioidusta vuotopinta-alasta ( $0,49 \text{ m}^2$ ) koostuu juuri tuubiläpivienneistä ja tuubikäyristä.

## 9.1 Vuotoilman aiheuttamat kustannukset

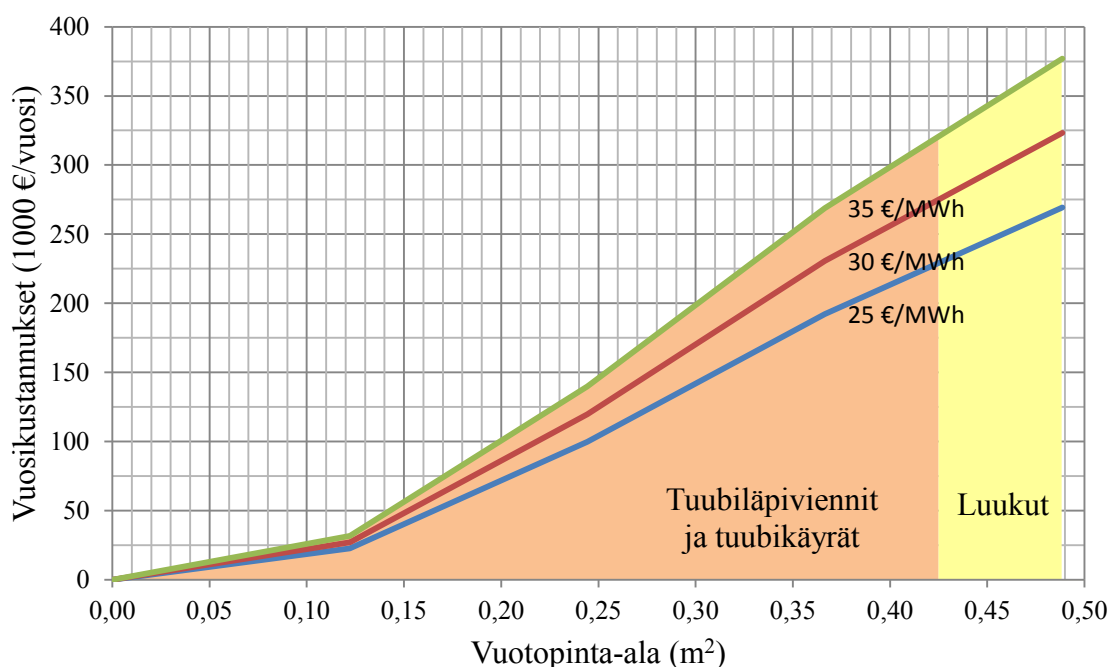
Luvussa 2.2 osoitettiin ilmapuotojen vaikutus prosessiuunin energiataseeseen. Uunin vuotava ulkoilma joudutaan kuumentamaan savukaasujen lämpötilaan, mikä lisää polttokaasun kulutusta. Lisäksi vuotoilma voi vaikuttaa palamistapahtumaan ja lämmönsiirtoon, minkä vuoksi polttokaasun kulutuksen lisäystä ei voida määrittää pelkästään ilman lämmitystarpeesta. Tämän vuoksi tässä työssä polttoaineen kulutuksen kasvu arvioidaan luvussa 6.3 rakennettujen simulointimallien avulla.

### 9.1.1 Kustannukset, BA-501

Prosessiuunin BA-501 simulointimalliin lisättiin  $9533,8 \text{ kg/h}$  vuotoilmavirtaus uunin säteilyosaan. Samalla uunin palamisilmamäärä haettiin vastaamaan palamisilman ventuurilta mitattua ilmavirtaa  $45714,7 \text{ kg/h}$  savukaasujen happipitoisuutta iteroimalla. Vastaavat simuloinnit tehtiin myös tapauksille, joissa vuotoilmavirtaus on 75 %, 50 %, 25 % ja 0 % kokonaisvuotomäärästä ja varsinainen palamisilmavirta säilyy samana. Täysin vuodottomassa tapauksessa savukaasujen happipitoisuus laski kuitenkin arvoon 0,76 mol-%, joka on vähemmän kuin normaalitilanteessa uunilla pyritään ajamaan. Tämän vuoksi vuodottomassa tapauksessa nostettiin palamisilmavirta arvoon  $48540,2 \text{ kg/h}$ , jolloin savukaasujen happipitoisuus oli 1,70 mol-%. Tämän jälkeen voitiin lukea poltto-

kaasun kulutus simulointituloksista ja verrata vuotoilmavirralla laskettuja arvoja ilman vuotoa laskettuun arvoon.

Täydellä vuotomäärällä polttokaasun kulutus kasvoi 90 kg/h ja 3,3 % verrattuna vuodotoman tapauksen polttokaasun kulutukseen. Vuotomäärän laskiessa myös kulutus putosi lähes lineaarisesti. Kuvassa 33 on esitetty ilmavuotojen aiheuttamat polttokaasun lisäkustannukset vuodessa eri polttokaasun hinnoilla. Kokonaisvuotomäärän kattavana vuotopinta-alana on käytetty edellä laskettua arvoa 0,49 m<sup>2</sup>. Vuotomäärän on oletettu muuttuvan samassa suhteessa vuotopinta-alan kanssa. Liitteessä 5 on esitetty uunin virtauskaavio ja tarkemmat simulointitulokset sekä täydellä vuotomäärällä että ilman vuotoa.



**Kuva 33** Prosessiuunin BA-501 ilmavuotojen aiheuttamat vuosikustannukset eri polttokaasun hinnoilla. Vertailutilanteena on käytetty vuodotonta ajoa savukaasujen happipitoisuudella 1,7 mol-% O<sub>2</sub>. Käyrät on määritetty hetkellisten mittaus- ja simulointitietojen perusteella, jolloin ulkoilman lämpötila oli 2,9 °C. Käyrän maksimi kohdassa 0,49 m<sup>2</sup> vastaa 9533,8 kg/h vuotoa.

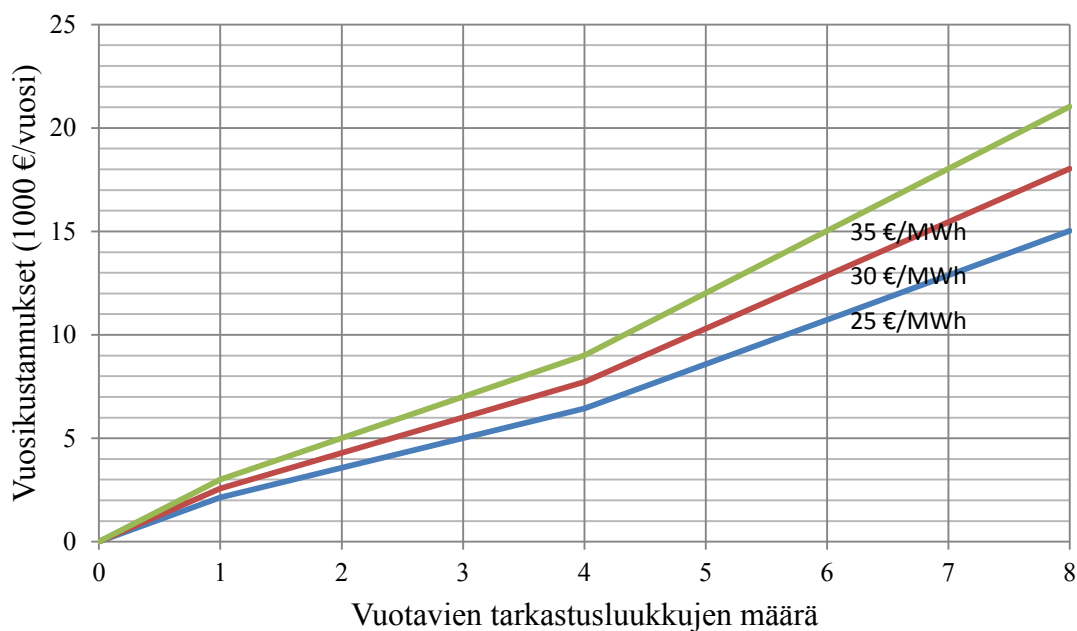
Polttokaasun hinnasta riippuen uunin BA-501 ilmavuotojen vuosikustannukset ovat 269000–377000 euroa ulkoilman lämpötilan ollessa 2,9 °C. Jos kaikki uunin vuotosaumat oletetaan yhtä leveiksi, valtaosa (87 %) vuotuisista lisäkustannuksista syntyy tuubiläpivientien ja tuubikäyrien vuodoista ja loput erilaisten luukkujen vuodoista. Todellisuudessa vuotojen aiheuttamat lisäkustannukset ovat pienempiä, koska vuoden keskilämpötila on tavallisesti korkeampia kuin simuloinnissa käytetty 2,9 °C. Vuonna 2014 Porvoon jalostamolta mitattu keskilämpötila oli noin 7,5 °C.

Simulointimallissa tutkittiin myös vuotoilman lämpötilan vaikutusta kustannuksiin käytämällä vuoden 2014 keskilämpötilaa. Muutoksella ei ollut juurikaan merkitystä poltton kaasun kulutukseen ja vuosikustannuksiin. Tällöin ei kuitenkaan muutettu ilman esilämmittimelle tulevan palamisilman lämpötilaa. Mikäli halutaan tutkia tarkemmin ulkolämpötilan muutosta, tulisi uuni mallintaa kokonaan uuteen toimintapisteeseen, jossa myös palamisilma tulee esilämmittimelle lämpötilassa 7,5 °C. Koska uunin toimintapiste muuttuu, tarvitaan vertailukelpoista mittausdataa uunin instrumenteilta vastaavissa olosuhteissa, jotta voidaan määrittää uusi kokonaisvuotomäärä. Täten pelkästään simulointimallia muuttamalla ei saada selville uutta kokonaisvuotomäärää ja vuotuisia lisäkustannuksia. Vuosittaista kustannusarviota voidaan tarkentaa uunin jatkuvalla mallinnuksella esimerkiksi kuukausittain käyttäen ulkoilmalle kuukauden keskilämpötilaa.

### **9.1.2 Kustannukset, BA-10401**

Prosessiuunin BA-10401 vuotojen aiheuttamia lisäkustannuksia arvioitiin tarkastusluukuille tehtyjen mittausten perusteella. Yhden täysin kiinni olevan luukun vuotomäärän 58,06 kg/h oletettiin menevän kaikista kahdeksasta luukusta, joten simulointimallissa uunin säteililyosaan syötettiin 464,48 kg/h vuotoilmavirtaus. Tämän jälkeen savukaasujen happipitoisuutta muuttamalla haettiin vuotoilman ja palamisilman summa yhtä suureksi kuin luvussa 6.3.2 laskettu palamisilmamäärä 20056,7 kg/h. Haettu palamisilman määrä pidettiin vakiona, ja laskettiin tarvittava polttokaasun määrä ilman vuotoja sekä erikokoisten vuotojen kanssa.

Normaalitilanteessa uunin BA-10401 tarkastusluukut ovat kiinni, mutta luukun saumoista vuotaa ilmaa uunin sisäpuolelle. Simulointimallissa kahdeksan luukun vuotaessa polttokaasun kulutus kasvoi 5 kg/h ja 0,5 % vuodottoman tapauksen polttokaasun kulutukseen nähden. Vuotomäärän pienentyessä polttokaasun kulutus ei kuitenkaan pienentynyt aivan yhtä lineaarisesti kuin uunilla BA-501. Kuvassa 34 on esitetty uunin BA-10401 tarkastusluukkujen vuotojen aiheuttamat vuosikustannukset eri polttokaasun hinnoilla. Vuosikustannukset normaalissa tilanteessa ovat siis 15000–21000 euroa, kun kaikki luukut vuotavat yhtä paljon ja ilman lämpötila on 10 °C.



**Kuva 34** Prosessiuunin BA-10401 kiinni olevien tarkastusluukkujen vuosikustannukset eri poltto-  
kaasun hinnoilla. Käyrät on määritetty hetkellisen mittaus- ja simulointitietojen perusteella, jolloin  
ulkoilman lämpötila oli 10 °C. Kahdeksan luukun vuotomäärä vastaa 464,5 kg/h vuotoa.

Uunin BA-10401 tarkastusluukkujen vuotojen aiheuttamat kustannukset ovat siis huomattavasti pienempiä kuin uunin BA-501 vuotojen kokonaiskustannukset. Uunin BA-10401 tarkasteluhetkellä ilman lämpötila oli kuitenkin hieman korkeampi kuin esimerkiksi vuoden 2014 vuoden keskilämpötila, 7,5 °C. Täten vuotoilma on keskimäärin hieman kylmempää kuin simulointimallissa ja vuosikustannukset ovat hieman suuremmat. Uunin BA-501 tapaan kustannusarvion tarkentaminen vaatisi kuitenkin uuden uunimallinnuksen toimintapisteessä, joka on lähempänä vuotuista keskilämpötilaa, tai jatkuvaa mallinnusta esimerkiksi kuukausittain.



## 10 Johtopäätökset ja jatkokehitysehdotukset

Prosessiuunien ilmavuodot vaikuttavat merkittävästi uunin energiatehokkuuteen ja toimintaan. Alipaineiseen uuniin virtaava ulkoilma jäädyttää uunია lisäten polttoaineen kulutusta ja vähentäen uunin käyttöikää. Tuotantovolyymin ja polttoaineen kulutuksen ollessa suurta pienistäkin ilmavuodoista voi koitua merkittäviä lisäkustannuksia. Näin ollen prosessiuunien ilmavuotoja tulisi arvioida säännöllisesti ja tarvittaessa korjata.

Ilmavuotoja voidaan arvioida sekä mittaamalla että laskennallisesti. Mittaaminen edellyttää valmiiksi tiedossa olevan vuotokohdan, jonka läpi menevää vuotoilmavirtaa voidaan mitata anemometrillä. Laskennallinen arviointi voidaan toteuttaa tekemällä simulointimalli uunin hetkellisestä ajotilanteesta ja vertaamalla simulointimallin palamisilmavirtaa mitattuun ilmavirtaan. Tällöin saadaan määritetty uunin kokonaisvuotomäärä. Samalla mallilla voidaan tehdä uunille tasetäsmäys, tarkastaa mittausrämenttien luotettavuus sekä arvioida ilmavuotojen aiheuttamia polttoainekustannuksia. Laskennallista ilmavuotojen määrittästä voidaan siis pitää perämenetelmänä, jota voidaan edelleen tarkentaa mittaamalla yksittäisiä vuotokohtia. Säännöllisen uunimallinnuksen avulla saadaan paljon arvokasta tietoa uunin toiminnasta. Täten prosessiuunien mallintaminen ja säännöllinen mallien päivitys tulisi sisällyttää osaksi jalostamon käytön seurantaa ja energiaoptimointia.

Kaasuöljyn jakotäsläusyksikön prosessiuunissa BA-501 on uunimallinnuksen perusteella hyvin merkittävä määrä ilmavuotoja. Suurin osa uunin potentiaalisista vuotosäumoista on tuubiläpivienneissä tai tuubikäyrissä. Kokonaisuudessaan uunin ilmavuodot lisäävät polttokaasun kulutusta noin 3,3 % aiheuttaen vuositäsollla noin 250000–400000 euroa lisäkustannuksia. Säästöpotentiaali on merkittävä, sillä jo korjaamalla puolet ilmavuodoista voidaan säästää polttoainekustannuksissa 170000–240000 euroa vuodessa riippuen polttoaineen hinnasta. Täten kaikki uunin BA-501 potentiaaliset vuotokohdat on syytä tarkastaa ja tiivistää huolella.

Kaasuöljyn rikänpöistöyksikön 3 prosessiuunin BA-10401 tarkastusluukuista mitattiin selkeitä vuotoilmavirtauksia myös luukkujen ollessa suljettuina. Yhteenlaskettuna luukkujen vuodot lisäävät polttokaasun kulutusta noin 0,5 % ja aiheuttavat vuodessa noin 15000–25000 euron lisäkustannukset. Yhden tarkastusluukun korjaamisella voidaan

säästää vuodessa 1600–3000 euroa riippuen vuotojen kokonaismäärästä ja polttoaineen hinnasta. Näin ollen uunin BA-10401 tarkastusluukkujen saumat tulisi tiivistää paremmin vuotojen ehkäisemiseksi.

MHC-tislausosan prosessiuunissa BA-75001 ei havaittu ilmapuotoja mittaus- ja laskentatarkkuuden puitteissa. Tarkan energiataseen muodostamiseksi uunin kaikissa virroissa tulisi olla sekä paine että lämpötilamittaukset ennen ja jälkeen uunin. Riittävä määrä mittaustietoa helpottaa simulointimallin rakentamista ja mahdollistaa uunin toiminnan kuvaamisen tarkemmin. Mikäli uunia BA-75001 halutaan mallintaa useammin, konvektio-osan höyryjen instrumentointia kannattaa siirtää lähemmäksi uunia.

Prosessiuuni tulee pitää pienessä alipaineessa, jotta savukaasut eivät vuoda ulos uunista. Optimiarvona säteilyosan yläosan vedolle voidaan pitää 25 Pa alipainetta, kun taas tätä suurempi alipaine lisää tarpeettomasti vuotoilman määrää. Operoinnin kannalta on olennaista, että uunin veto mitataan säteilyosan yläosasta, jossa veto on pienimmillään. Tällöin voidaan varmistaa, että uuni pysyy alipaineisena ja että mitattu veto on vertailukelpoinen muihin uuneihin. Uunien BA-10401 ja BA-75001 vetomittaus tulisi vaihtaa säteilyosan alaosaan säteilyosan yläosaan ja säätää veto lähelle optimiarvoa.

Ilmapuotojen määrityksen lisäksi tulisi myös pyrkiä tarkastelemaan uunin ilma- ja savukaasukiertoa sekä optimoimaan palamisilmaa. Uunien ilmarekistereiden optimoinnilla saadaan palamisilma jakautumaan tasaisesti polttimille. Samalla savukaasujen happipitoisuus ja palamisilman määrä lasketaan arvoon, jolla saadaan mahdollisimman suuri absorboitunut teho suhteessa polttokaasun kulutukseen. Palamisen laatua voidaan seurata tarkkailemalla polttimien liekkien värejä. Porvoon jalostamon operaattorikoulutukseen tulisi sisällyttää uunin ilmarekistereiden säätöä, ja palamisilman optimointia tulisi toteuttaa säännöllisesti sen suuren energiansäästöpotentiaalin vuoksi.

## Lähdeluettelo

Ahamad, S. & Vallavanatt, R. 2012. Identify and control excess air from process heaters. Hydrocarbon Processing. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 23.1.2015]. Saatavissa: <http://www.hydrocarbonprocessing.com/Article/3096471/Identify-and-control-excess-air-from-process-heaters.html>.

ASHRAE. 2013. ASHRAE Handbook – Fundamentals SI Edition. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN 978-1-62870-535-5 (sähköinen). ISBN 978-1-936504-46-6 (painettu). ISSN 1523-7230.

Baukal, C. E. & Bussman, W. R. 2011. Air Infiltration Effects on Industrial Combustion Efficiency. Energy Science, Engineering and Technology: Fuel Efficiency. New York, USA : Nova Science Publishers. ISBN 978-1-61122-194-7.

Couper, J. R. & Penney, W. R. & Fair, J. R. & Walas, S. M. 2010. Chemical Process Equipment – Selection and Design. 2<sup>nd</sup> ed. Burlington, USA: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-091972-0 (sähköinen). ISBN 978-0-12-372506-6 (painettu).

Crane Co. 2009. Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe. Stamford, Connecticut, USA: Crane. ISBN 1-40052-712-0.

Fortum, 2003. Polttoimittajien esittelykalvot. Porvoo: Neste Oil.

Hall, S. & Lyons, J. & Storm, S. K. 2010. Real-Time Monitoring System Measures Air In-Leakage. Power Magazine. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavissa: <http://www.powermag.com/real-time-monitoring-system-measures-air-in-leakage/>.

Harvey, L. 2015. Outside Sales and Service Engineer. John Zink Hamworthy Combustion. Hamworthy Combustion Engineering Ltd, Fleets Corner, Poole, Dorset BH17 0LA, UK. Haastattelu 12.3.2015.

Ibrahim, H. A. & Al-Qassimi, M. M. 2010. Simulation of heat transfer in the convection section of fired process heaters. *Chemical Engineering*. Vol. 54:1 S. 33–40. ISSN: 1587-3765.

Institution of Chemical Engineers. 2012. BP Process Safety Series – Safe Furnace and Boiler Firing, 5th ed. Rugby. UK: Institution of Chemical Engineers. ISBN 978-1-62198-114-5 (sähköinen). ISBN 978-0-85295-556-7 (painettu).

Kotiaho, V. W. & Lampinen, M. J. & Seppälä, A. 2004. Termodynamiikan ja lämmön-siirto-opin taulukoita. Teknillinen korkeakoulu. ISBN 951-22-7259-8. ISSN 1455-7533.

Lampinen, M. J. & El Haj Assad, M. & Kotiaho, V. & Saari, K. & Wikstén, R. 2010. Teknillinen termodynamiikka. Teknillinen korkeakoulu. ISBN 978-952-248-235-8. ISSN 1455-7533.

Lampinen, M. J. & Seppälä, A. 2008. Kemiallinen termodynamiikka energiatekniikassa. Teknillinen korkeakoulu. ISBN 978-951-22-9212-7. ISSN 1455-7533.

Lieberman, N. 2009. Troubleshooting Process Operations 4th ed. Tulsa, Oklahoma, USA: PennWell. ISBN 978-1-61583-804-2 (sähköinen). ISBN 978-1-59370-176-5 (painettu).

Mallikarjuna, V. & Jashuva, N. & Rama Bhupal Reddy, B. 2014. Improving Boiler Efficiency by Using Air Preheater. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*. Vol. 3 No. 2 S. 11–24. ISSN 2278-6252.

Mullinger, P. & Jenkins, B. 2008. Industrial and Process Furnaces – Principles, Design and Operation. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08055-806-6 (sähköinen). ISBN 978-0-7506-8692-1 (painettu).

Neste Oil. 2008. NP0-6778, Porvoon tuotantolaitokset, Vaihe 1, tilaluokitus. Porvoo: Neste Oil.

Neste Oil. 2013. NP0-19777, Porvoon tuotantolaitokset, tuotantolinja TL3, KARPT3, BERP3 ja RT3, tilaluokitus. Porvoo: Neste Oil.

Neste Oil. 2014. NP0-14997, Production line 4, residue hydrocracking unit, area classification. Porvoo: Neste Oil.

Neste Oil. 2015a. Yritysinfo. [Verkkosivut]. [Viitattu 23.1.2015]. Saatavissa: <http://www.nesteoil.fi/yritysinfo>.

Neste Oil. 2015b. OQD-4454: liite 1. Mittalaitetiedot. Porvoo: Neste Oil.

Pansini, A. J. & Smalling K. D. 2006. Guide to Electric Power Generation. 3<sup>rd</sup> ed. Lilburn, GA, USA: The Fairmont Press. ISBN 978-1-62870-185-2 (sähköinen). ISBN 978-0-88173-524-6 (painettu).

Peramanu, S. & Wah, J. C. 2011. Improve material balance by using proper flowmeter corrections. Hydrocarbon Processing. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 4.6.2015]. Saatavissa: <http://www.hydrocarbonprocessing.com/Article/2913712/Improve-material-balance-by-using-proper-flowmeter-corrections.html>.

PFR Engineering Systems. 2015. FRNC-5PC. [Verkkosivut]. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavissa: <http://www.pfengineering.com/products/frnc-5pc/>.

Shekarchian, M. & Zarifi, F. & Moghavvemi, M. & Motasemi, F. & Mahlia, T. M. I. 2013. Energy, exergy, environmental and economic analysis of industrial fired heaters based on heat recovery and preheating techniques. Energy Conversion and Management Vol. 71 S. 51–61. ISSN 0196-8904

Sinnott, R. K. & Towler, G. 2009. Chemical Engineering Design – SI Edition. 5th ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-0809-4249-0 (sähköinen). ISBN 978-0-7506-8551-1 (painettu).

Storm, S. K. & Guffre, J. 2010. Experiences with Regenerative Air Heater Performance Evaluations & Optimization. POWER-GEN Europe. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 25.2.2015]. Saatavissa: <http://www.paragonairheater.com/images/downloads/Papers/PowerGenEurope2010PaperFinal.pdf>

Swema. 2015. SwemaFlow 125 Operating instructions. [Käyttöohjekirja] Saatavissa: [http://www.swema.com/Prod\\_docs/SwemaFlow/SwemaFlow125D\\_1.16\\_eng.pdf](http://www.swema.com/Prod_docs/SwemaFlow/SwemaFlow125D_1.16_eng.pdf)

Thumann, A. & Mehta D. P. 2013. Handbook of Energy Engineering. 7th ed. Lilburn, GA, USA: The Fairmont Press. ISBN 978-1-62870-179-1 (sähköinen). ISBN 0-88173-695-3 (painettu).

Torkkel, T. 2015. Kunnossapitoinsinööri. Neste Oyj. Espoo, PL 95, 00095. NESTE. Haastattelu 16.2.2015.

Trambouze, P. 2000. Petroleum Refining Vol. 4 Materials and Equipment. Paris, France: Editions Technip. ISBN 978-1-62198-774-1 (sähköinen). ISBN 2-7108-0761-0 (painettu).

Väänänen, T. 2015. Kunnossapitoinsinööri. Neste Oyj. Espoo, PL 95, 00095 NESTE. Haastattelu 16.2.2015.

Vedavarz, A. & Kumar, S. & Hussain, M. I. 2007. HVAC: Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning for Design and Implementation. New York, USA: Industrial Press. ISBN 978-1-61344-309-5 (sähköinen). ISBN 978-0-8311-3163-0 (painettu).

Wikstén R. 1995. Lämpövoimaproessit. 4. painos. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press. ISBN 978-951-672-365-8.

## Liiteluettelo

Liite 1. Kuvan 16 ilmavuotojen arviointikäyrän kaavat. 1 sivu.

Liite 2. Ilmavuotojen mittaustulokset, BA-501. 2 sivua.

Liite 3. Ilmavuotojen mittaustulokset, BA-10401. 2 sivua.

Liite 4. CFD-simuloinnin korjauskertoimet. 2 sivua.

Liite 5. Ilmavuotojen vaikutukset simulointiin, BA-501. 2 sivua.

**Liite 1. Kuvan 16 ilmavuotojen arviointikäyrän kaavat**

$$\Delta p = C \times 3 \times 0,003 \times 3 \times \rho \times 3 \times v^2$$

$$\dot{m} = \frac{115\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{T}}$$

Missä:

$\Delta p$	veto vuotoaukon korkeudella (tuumaa H <sub>2</sub> O)
$\rho$	ulkoilman tiheys (lb/ft <sup>3</sup> )
$v$	ilman nopeus vuotoaukossa (ft/s)
$C$	dynaamisen paineen nostokorkeus, C = 1
$\dot{m}$	vuotoilman massavirta (lb/ft <sup>2</sup> s)
$T$	ulkoilman lämpötila (°R)



## Liite 2. Ilmavuotojen mittaustulokset, BA-501

Ilmavuotojen mittaustulokset KTY BA-501 30.3.2015 klo. 10.15–11.30. Mittaushetkellä ilman lämpötila 1,5 °C ja uunin veto -30 Pa.

Mittauskohde	Nopeus (m/s)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)
Tarkastusluukku nro. 1, ylätaso, suojalevy alhaalla	0,90	28,59
Tarkastusluukku nro. 1, ylätaso, suojalevy alhaalla	0,89	28,27
Tarkastusluukku nro. 1, ylätaso, suojalevy alhaalla	0,92	29,23
Tarkastusluukku nro. 2, ylätaso, suojalevy alhaalla	0,68	21,60
Tarkastusluukku nro. 2, ylätaso, suojalevy alhaalla	0,67	21,29
Tarkastusluukku nro. 2, ylätaso, suojalevy alhaalla	0,64	20,33
Tarkastusluukku nro. 3, poltintaso, suojalevy alhaalla	0,31	9,85
Tarkastusluukku nro. 3, poltintaso, suojalevy alhaalla	1,38	43,84
Tarkastusluukku nro. 3, poltintaso, suojalevy alhaalla	1,33	42,25
Tarkastusluukku nro. 4, poltintaso, suojalevy alhaalla	1,27	40,35
Tarkastusluukku nro. 4, poltintaso, suojalevy alhaalla	1,19	37,81
Tarkastusluukku nro. 4, poltintaso, suojalevy alhaalla	1,21	38,44
Tarkastusluukku nro. 1, ylätaso, suojalevy ylhäällä	1,12	35,58
Tarkastusluukku nro. 1, ylätaso, suojalevy ylhäällä	1,17	37,17
Tarkastusluukku nro. 1, ylätaso, suojalevy ylhäällä	1,21	38,44
Tarkastusluukku nro. 2, ylätaso, suojalevy ylhäällä	0,95	30,18
Tarkastusluukku nro. 2, ylätaso, suojalevy ylhäällä	0,92	29,23
Tarkastusluukku nro. 2, ylätaso, suojalevy ylhäällä	0,91	28,91
Tarkastusluukku nro. 3, poltintaso, suojalevy ylhäällä	1,21	38,44
Tarkastusluukku nro. 3, poltintaso, suojalevy ylhäällä	1,16	36,85
Tarkastusluukku nro. 3, poltintaso, suojalevy ylhäällä	1,21	38,44

Tarkastusluukku nro. 4, poltintaso, suojalevy ylhäällä	1,39	44,16
Tarkastusluukku nro. 4, poltintaso, suojalevy ylhäällä	1,44	45,75
Tarkastusluukku nro. 4, poltintaso, suojalevy ylhäällä	1,39	44,16
Poltin no. 10, puuttuva polttimen tarkastusluukku	1,14	8,06
Poltin no. 10, puuttuva polttimen tarkastusluukku	1,01	7,14
Poltin no. 10, puuttuva polttimen tarkastusluukku	1,03	7,28
Poltin no. 12, avattu polttimen tarkastusluukku	1,11	7,85
Poltin no. 12, avattu polttimen tarkastusluukku	1,08	7,63
Poltin no. 12, avattu polttimen tarkastusluukku	1,14	8,06

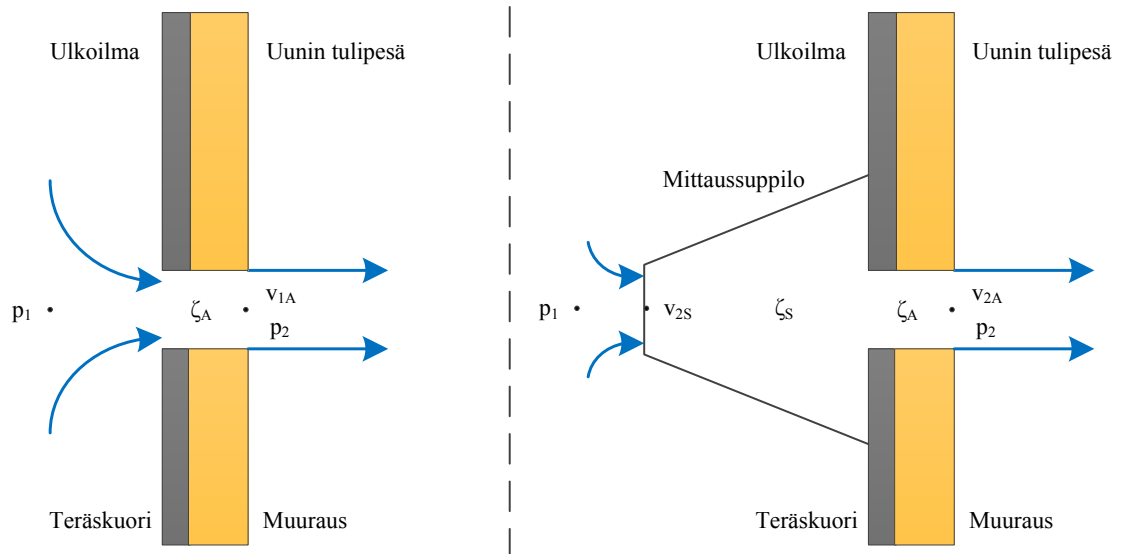
## Liite 3. Ilmavuotojen mittaustulokset, BA-10401

Ilmavuotojen mittaustulokset KARP3 BA-10401 24.3.2015 klo. 11.30–13.00. Mittaushetkellä ilman lämpötila 10 °C ja uunin veto -540 Pa.

Mittauskohde	Nopeus (m/s)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)
Tarkastusluukku nro. 1, kaikki kiinni	1,56	49,56
Tarkastusluukku nro. 1, kaikki kiinni	1,47	46,70
Tarkastusluukku nro. 1, kaikki kiinni	1,36	43,21
Tarkastusluukku nro. 2, kaikki kiinni	1,50	47,65
Tarkastusluukku nro. 2, kaikki kiinni	1,23	39,08
Tarkastusluukku nro. 2, kaikki kiinni	1,41	44,79
Tarkastusluukku nro. 1, sivulevy poistettu	8,66	275,12
Tarkastusluukku nro. 1, sivulevy poistettu	8,44	268,13
Tarkastusluukku nro. 1, sivulevy poistettu	8,93	283,70
Tarkastusluukku nro. 2, sivulevy poistettu	5,69	180,77
Tarkastusluukku nro. 2, sivulevy poistettu	5,73	182,04
Tarkastusluukku nro. 2, sivulevy poistettu	5,66	179,81
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 0 mm	1,80	57,18
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 0 mm	1,69	53,69
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 0 mm	1,84	58,46
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 25 mm	14,39	457,16
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 25 mm	14,04	446,04
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 25 mm	14,66	465,73
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 50 mm	21,74	690,66
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 50 mm	21,18	672,87
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 50 mm	22,18	704,64

Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 75 mm	25,18	799,94
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 75 mm	25,22	801,22
Tarkastusluukku nro. 1, luukku auki, levyn raotus 75 mm	24,66	783,42
Tarkastusluukku nro. 1, luukku ja levy täysin auki	26,42	839,34
Tarkastusluukku nro. 1, luukku ja levy täysin auki	28,00	889,53
Tarkastusluukku nro. 1, luukku ja levy täysin auki	26,13	830,13
Tarkastusluukku nro. 1, luukku ja levy täysin auki	27,62	877,46
Tarkastusluukku nro. 2, luukku ja levy täysin auki	25,19	800,26
Tarkastusluukku nro. 2, luukku ja levy täysin auki	25,14	798,67
Tarkastusluukku nro. 2, luukku ja levy täysin auki	25,20	800,58

## Liite 4. CFD-simuloinnin korjauskertoimet



Prosessiuunin ilmapuotojen virtauslaskennan suuret ilman mittaussuppiloa ja -suppilon kanssa.

$$\begin{cases} p_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_{1A}^2 + \frac{1}{2}\zeta_A \rho v_{1A}^2 \\ p_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_{2A}^2 + \frac{1}{2}\zeta_A \rho v_{2A}^2 + \frac{1}{2}\zeta_S \rho v_{2S}^2 \end{cases}$$

$$v_{1A}^2 + \zeta_A v_{1A}^2 = v_{2A}^2 + \zeta_A v_{2A}^2 + \zeta_S v_{2S}^2$$

$$\left(\frac{\dot{V}_1}{A_A}\right)^2 + \zeta_A \left(\frac{\dot{V}_1}{A_A}\right)^2 = \left(\frac{\dot{V}_2}{A_A}\right)^2 + \zeta_A \left(\frac{\dot{V}_2}{A_A}\right)^2 + \zeta_S \left(\frac{\dot{V}_1}{A_S}\right)^2$$

$$\frac{\dot{V}_1^2}{A_A^2} (1 + \zeta_A) = \frac{\dot{V}_2^2}{A_A^2} (1 + \zeta_A) + \zeta_S \frac{\dot{V}_2^2}{A_S^2}$$

$$\frac{\dot{V}_1^2}{\dot{V}_2^2} = 1 + \zeta_S \frac{A_A^2}{A_S^2 (1 + \zeta_A)}$$

$$\text{Korjauskerroin} = \frac{\dot{V}_1^2}{\dot{V}_2^2} = \sqrt{1 + \frac{\zeta_S A_A^2}{A_S^2 (1 + \zeta_A)}}$$

Missä:

$p_1$	ulkoilman paine (Pa)
$p_2$	paine uunin sisäpuolella (Pa)
$v_{1A}$	nopeus vuotoaukossa ilman suppiloa (m/s)
$\zeta_A$	vuotoaukon kertavastuskerroin
$v_{2A}$	nopeus vuotoaukossa suppilon kanssa (m/s)
$\zeta_S$	suppilon kertavastuskerroin
$v_{2S}$	nopeus suppilon suulla (m/s)
$\dot{V}_1$	tilavuusvirta ilman suppiloa (m <sup>3</sup> /s)
$\dot{V}_2$	tilavuusvirta suppilon kanssa (m <sup>3</sup> /s)
$A_A$	vuotoaukon poikkipinta-ala (m <sup>2</sup> )
$A_S$	suppilon suun poikkipinta-ala (m <sup>2</sup> )

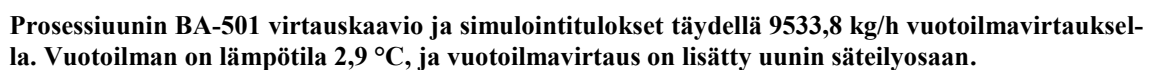
CFD-simuloinnin perusteella lasketut kertavastuskertoimet vuotoaukolle ja mittaussuppilolle sekä korjauskerroin suppilon kanssa mitatuille vuotoilmavirroille. Mittaussuppilon kapeamman päädyn poikkipinta-ala on 88,247 cm<sup>2</sup> (Ø 106 mm).

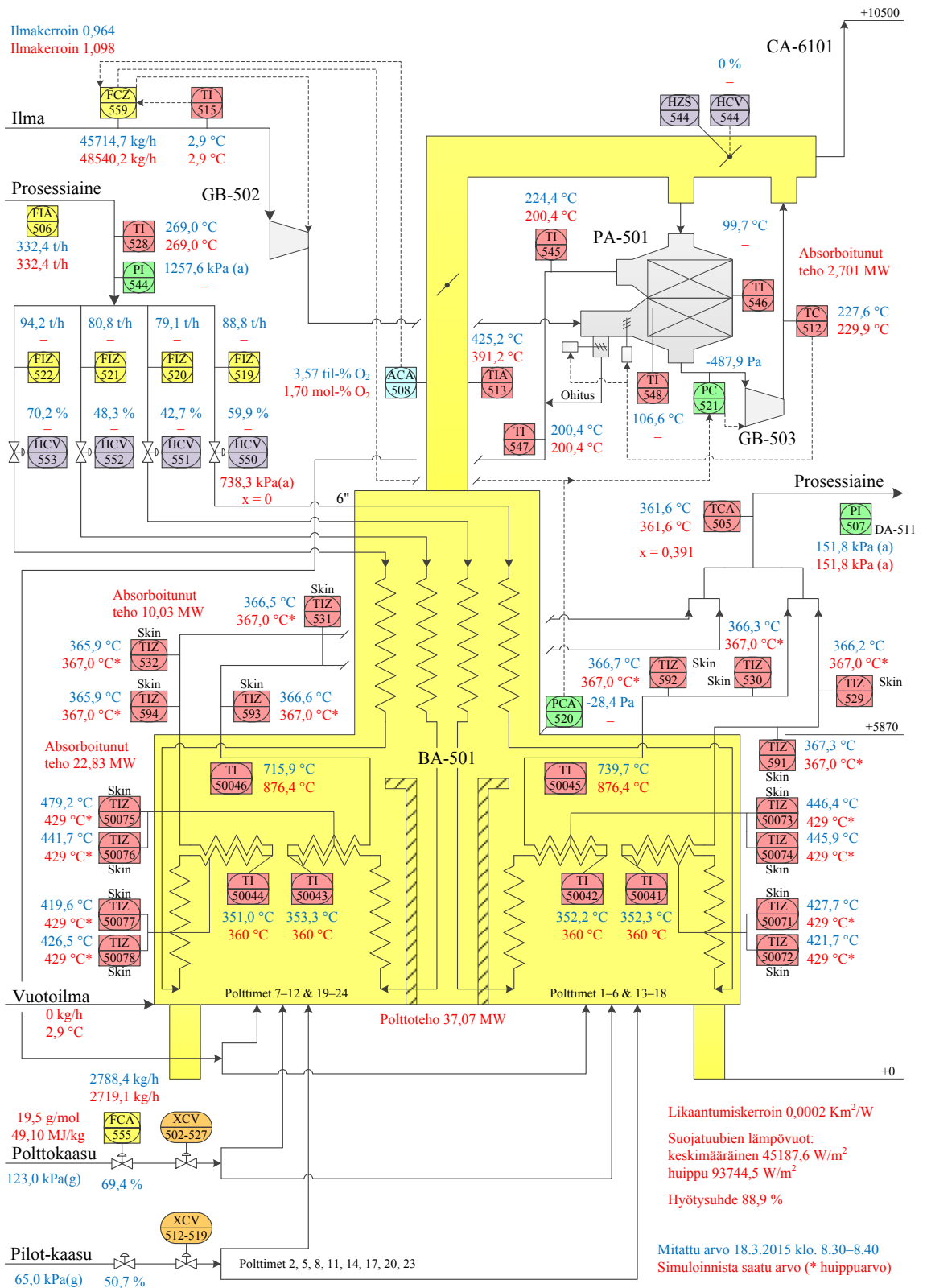
Tarkastusluokku nro. 1	Kertavastuskerroin $\zeta$		
	Vuotoaukko	Mittaussuppilo	Korjauskerroin
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 50 mm	2,241	1,726	1,355
Kansi poistettu, sivulevyn raotus 75 mm	1,565	1,660	1,758
Kansi ja sivulevy poistettu	1,666	1,730	2,213

Kertavastuskertoimet:

$$\zeta_A = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{\dot{V}_1}{A_A}\right)^2} - 1$$

$$\zeta_S = \left[ \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^2 - 1 \right] \frac{A_S^2(\zeta_A + 1)}{A_A^2}$$





**Prosessiuunin BA-501 virtauskaavio ja simulointitulokset vuodottomassa tapauksessa. Savukaasujen happipitoisuus on säädetty arvoon 1,70 mol-% O<sub>2</sub>. Tuloksia on käytetty vertailutilanteena ilma-  
vuotojen kustannusten arvioinnissa.**